

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# NÁVRH HLAVY VÁLCE TYPU TRIFLUX PRO ZÁŽEHOVÝ MOTOR

DESIGN STUDY OF TRIFLUX CYLINDER HEAD FOR SI ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTINA PROVAZNÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. DAVID SVÍDA

BRNO 2008

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá podstatou a možnostmi dnešní počítačové dynamiky tekutin neboli CFD. Dále se věnuje návrhu sacích kanálů hlavy válce typu triflux, a to na základě hlavy válce Škoda 1,2 HTP převedené do digitální podoby 3D skenerem. Po vytvoření modelu s klasickým umístěním sacích kanálů a modelu se sacími kanály systému triflux je provedena simulace proudění těmito kanály pomocí CFD programu.

## **Annotation**

This diploma thesis concern with substance and possibilities of contemporary computational fluid dynamics or CFD. Further it engages in design of intake ports of triflux cylinder head on the basis of cylinder head of Škoda 1,2 HTP that was digitized by 3D scanner. After design of standard intake ports and triflux system's intake ports is maden simulation of flow through these intake ports with the assistance of CFD program.

## **Klíčová slova**

CFD, tekutiny, proudění, simulace, triflux

## **Keywords**

CFD, fluids, flow, simulation, triflux

## **Bibliografická citace**

PROVAZNÍKOVÁ, M. *Návrh hlavy válce typu triflux pro zážehový motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Davida Svídy a za pomoci uvedené literatury.

**Poděkování**

Chtěla bych poděkovat všem, kteří mi byli při tvorbě této práce jakkoli nápomocni. Zejména pak Ing. Davidu Svídovi za jeho pomoc, rady a připomínky. Velký dík patří také mým nejbližším za podporu.

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>7</b>
<b>2. CFD (Computational Fluid Dynamics).....</b>	<b>8</b>
2.1 Určující rovnice proudění .....	9
2.1.1 Základní typy rovnic proudění v CFD .....	10
2.1.2 Okrajové podmínky.....	10
2.1.3 Rovnice kontinuity .....	11
2.1.4 Pohybové rovnice .....	11
2.1.5 Rovnice energie .....	12
2.2 Relativní proudění .....	13
2.3 Diskretizace .....	15
2.4 Metody řešení rovnic v CFD .....	17
2.5 Interpretace výsledků .....	19
2.6 Simulace turbulence v CFD .....	22
<b>3. CFD programy .....</b>	<b>23</b>
3.1 Komplexní řešení .....	24
3.1.1 ANSYS CFX .....	24
3.1.2 FLUENT .....	26
3.1.3 POLYFLOW .....	28
3.1.4 FloWizard .....	28
3.1.5 STAR-CD .....	28
3.1.6 CFD-ACE+.....	28
3.1.7 CFD-FASTRAN .....	29
3.1.8 CFdesign .....	29
3.1.9 FLOTHERM .....	29
3.1.10 FLOVENT .....	29
3.2 Vytvoření sítě.....	29
3.2.1 GAMBIT .....	29
3.2.2 TGrid .....	30
3.2.3 GridPro .....	31
3.2.4 ANSYS ICEM CFD .....	32
3.2.5 ANSYS TurboGrid .....	32

3.2.6 Centaur .....	33
3.2.7 CFD-GEOM a CFD-VISCART .....	33
3.2.8 GridZ .....	34
3.3 Vizualizace .....	34
3.3.1 COVISE cfd .....	34
3.3.2 Tecplot 360 2008.....	34
3.3.3 CFD-VIEW .....	34
3.4 Systémy .....	34
3.4.1 Flownex .....	34
3.4.2 Flowmaster V7 .....	35
<b>4. Základní vlastnosti tekutin .....</b>	<b>36</b>
4.1 Základní fyzikální veličiny plynů .....	36
4.1.1 Teplota.....	36
4.1.2 Tepelná kapacita .....	37
4.1.3 Tlak.....	37
4.1.4 Hustota .....	38
4.1.5 Viskozita .....	38
<b>5. Proudění .....</b>	<b>39</b>
5.1 Laminární a turbulentní proudění .....	40
5.2 Mezní vrstva .....	41
5.3 Rozdělení proudění plynů podle Machova čísla .....	43
5.4 Nadzvukové proudění .....	44
<b>6. Proudění ve spalovacích motorech .....</b>	<b>46</b>
6.1 Základní vztahy pro popis proudění .....	47
6.1.1 Rovnice kontinuity .....	47
6.1.2 Eulerovy rovnice.....	48
6.1.3 Bernoulliho rovnice.....	50
<b>7. Plnění válce .....</b>	<b>50</b>
7.1 Plnicí účinnost .....	51
7.2 Sací kanály .....	52
7.3 Geometrické vlastnosti ventilů .....	53
7.4 Průtokový součinitel .....	55

7.5 Přepřínování .....	56
<b>8. Systém triflux .....</b>	<b>56</b>
<b>9. Digitalizace reálných objektů .....</b>	<b>60</b>
9.1 Systém ATOS (Advanced Topometric Sensor) .....	61
9.1.1 Rozdělení systémů ATOS .....	62
9.1.2 Nastavení a kalibrace systému ATOS .....	63
9.1.3 Proces měření .....	63
9.1.4 Výstupy z digitalizace .....	64
<b>10. Modelování sacích kanálů .....</b>	<b>65</b>
<b>11. CFD analýza proudění .....</b>	<b>67</b>
11.1 Vygenerování sítě .....	67
11.2 Okrajové podmínky .....	68
11.3 Simulace proudění .....	69
11.3.1 Modely klasickým uspořádáním sacích kanálů .....	70
11.3.2 Modely s uspořádáním sacích kanálů typu triflux .....	75
<b>12. Závěr .....</b>	<b>81</b>
<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>83</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>85</b>

## 1. Úvod

Problematickou proudění neboli mechanikou tekutin se lidé zabývali již v antice. Základní kámen položil v této oblasti antický filozof Aristoteles, který formuloval první myšlenky o proudění, dále následován Archimédem a jeho zákonem o plavání těles. Za zakladatele mechaniky tekutin je považován Leonhard Euler, švýcarský matematik a fyzik, který pro mechaniku tekutin vytvořil matematické základy. Leonhard Euler byl spolupracovníkem dalšího významného vědce na poli mechaniky tekutin, a to Daniela Bernoulliho, který je považován za zakladatele hydrodynamiky.

Obrovský nástup počítačů v minulém století měl za následek vznik počítačové dynamiky tekutin (CFD) umožňující rychlé výpočty, simulaci procesů a vytváření modelů pro proudění. I dnes si neustálé zdokonalování a vývoj počítačové dynamiky tekutin žádá stále lepší počítačové zázemí, které je ovšem v porovnání s nedávnou minulostí cenově mnohem přístupnější.

Proudění tekutin je nepostradatelnou součástí našeho života a je téměř všude kolem nás. Člověk potřebuje dýchat a pít, tělem nám neustále proudí krev a vzduch. Proudění jako takové je zapotřebí řešit v mnoha oblastech lidské činnosti, zejména pak v průmyslu. Bez poznatků o proudění tekutin si nelze představit např. energetický průmysl, automobilní a letecký průmysl, kosmonautiku, elektroprůmysl, biomechaniku, meteorologii, oceanografii, atd.

Například při návrhu automobilu je nezbytné množství výpočtů a následné optimalizace proudění. Je třeba brát v úvahu proudění v sacím systému motoru, prouděním ve spalovacím prostoru motoru, proudění ve výfukovém systému, proudění v systému topení a větrání automobilu, proudění kolem ventilátoru chlazení a proudění při obtoku karoserie vozu.

Zmíněné proudění v sacím systému motoru, resp. sacím potrubí má nezanedbatelný vliv na plnění válce motoru, tedy na výkon motoru. Proto je zde velmi důležité vhodné navržení sacího potrubí a to si lze ověřit právě za pomoci počítačové dynamiky tekutin.

## 2. CFD

CFD (Computational Fluid Dynamic), neboli počítačová dynamika tekutin je výpočetní postup pro simulaci proudění, který umožňuje modelování proudění, sdílení tepla a hmoty, a kupříkladu spalování. Výhodou CFD analýzy je vytvoření virtuálního prototypu systému, který lze sledovat v čase a posléze analyzovat odezvu na různé podněty.

Obecně je CFD velmi užitečné při řešení široké škály aplikací. Využívá se k simulaci proudění kolem vozidla, simulaci proudění v motoru vozidla atd. Velké uplatnění CFD nachází také např. v oblasti biomechaniky v případě vývinu oběhových a respiračních systémů. Za rozmach CFD analýzy může především její efektivnost z hlediska finančních nákladů oproti reálnému testování.

Proudění tekutin shrnuje mechanika tekutin, která se dále dělí na statiku, kinematiku a dynamiku tekutin. Obecně vychází mechanika tekutin ze tří principů:

- zákon zachování hmotnosti → rovnice kontinuity
- vztah působení vnějších sil na proudění → pohybové rovnice
- zákon zachování energie při proudění → rovnice energie

Jelikož je proudění tekutiny popsáno parciálními diferenciálními rovnicemi, což nazýváme matematickým modelem, není možné tyto rovnice řešit analyticky. Nicméně je možné získat přibližná řešení s pomocí počítače, a to je podstatou počítačové dynamiky tekutin.

Postup při tvorbě CFD analýzy:

- preprocesing
- solving
- postprocesing

Preprocesing zahrnuje přípravu modelu, tedy vytvoření geometrického modelu s využitím CAD systému. Mnohdy je nutné zjednodušení detailů modelu tak, aby nedocházelo ke zbytečnému zvyšování nároků na výpočetní techniku. Fáze preprocesingu zahrnuje také diskretizaci neboli vygenerování sítě bodů. Další fází je samotné řešení, kde je v CFD programu proveden výpočet. Posledním krokem je postprocesing, kde se jedná o vhodné zobrazení výpočtů.

V rámci počítačové dynamiky tekutin se řeší dva druhy úloh, a to:

- přímé
- nepřímé

Rozdíl mezi přímou a nepřímou úlohou počítačové dynamiky tekutin spočívá v řešení, kdy tyto úlohy mají rozdílné okrajové a počáteční podmínky. Společné mají tyto úlohy to, že se vychází ze stejných rovnic proudění.

Při řešení přímých úloh se získávají kvantitativní údaje o proudění pracovní látky v daném modelu (geometrii). Tyto údaje, jako např. rozložení tlaků, aerodynamické síly, tlakové ztráty, rychlost proudění atd., jsou důležité z hlediska posouzení, zda je výsledná geometrie vhodně navrhnutá, a to vzhledem ke kvalitě proudění tekutiny.



V praxi se ovšem častěji vyskytují úlohy nepřímé, což jsou úlohy formulované obráceně (inverzní úlohy) a jsou to úlohy mnohem složitější. Dochází zde k výpočtu geometrie prostoru konstrukce na základě kvantitativních údajů. U nepřímé úlohy připadají v úvahu dva možné přístupy:

- „cut and try“
- systematická modifikace

Přístup „cut and try“ spočívá v tom, že po výpočtu proudového pole dojde k analýze tohoto pole a následně se navrhnou změny v oblasti geometrie proudění. Poté se znovu aplikuje přímá úloha a ověří se, zda díky příslušným změnám geometrie vznikl požadovaný efekt. Postup se může opakovat, dokud nedojde ke zlepšení.

Přístup systematické modifikace je obdobný, ale není zde požadována taková interakce od uživatele, jelikož nad změnami geometrie má v tomto případě kontrolu naprogramovaný algoritmus. Úloha se řeší iteračně, je to vlastně série přímých úloh, kdy v jednotlivých krocích dochází k porovnávání výsledků přímé úlohy s požadovanými parametry a algoritmus pro změnu geometrie se dále řídí na základě zjištěného rozdílu.

## 2.1 Určující rovnice proudění

Určující rovnice proudění představuje systém nelineárních parciálních diferenciálních rovnic simulující proudění tekutin. Tyto [3] určující rovnice jsou formulací zákona zachování hmotnosti, zákona zachování energie a pohybového zákona. Obecně jde o pět rovnic, ze kterých se dá vypočítat pět neznámých veličin pro počáteční a okrajové podmínky. Nejčastěji lze pomocí formulace určujících rovnic přímo vypočítat hustotu, tři složky energie a specifickou energii. Ostatní veličiny, jako např. tlak, je možné vypočítat z termodynamických zákonitostí. Nejčastěji se používá stavová rovnice termodynamicky ideálního plynu.

V počítačové dynamice tekutin jsou kompletní určující rovnice různé pro viskózní a neviskózní proudění. Pro viskózní proudění jsou to Navier-Stokesovy rovnice a pro neviskózní proudění jsou to Eulerovy rovnice. Je zde odlišnost od klasické mechaniky tekutin, kde jsou takto označovány pouze pohybové rovnice formulované tak, že implicitně obsahují rovnici kontinuity.

Určující rovnice proudění tekutiny jsou z matematického hlediska řešitelné, pokud jsou splněny následující podmínky:

- existuje řešení
- existuje jen jedno řešení
- řešení je spojitě k počátečním a okrajovým podmínkám

Je zapotřebí, aby byl matematický problém dobře formulován. To znamená uvést důkaz řešitelnosti výše uvedených třech podmínek. První dvě podmínky se dají dokázat pro rovnice vystupující jako určující rovnice proudění. V případě proudění v oblasti přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním se vyskytují problémy pro splnění druhé podmínky, tedy podmínky jediného řešení. Podstatou třetí podmínky je, aby se řešení při malé změně počátečních nebo okrajových podmínek odpovídajícím způsobem změnilo. Při nesplnění této podmínky se do řešení vnáší chyby z pomocných podmínek. Pro počítačové řešení je definice

dobře formulovaného problému odpovídající definici dobře formulovaného matematického problému.

### 2.1.1 Základní typy rovnic proudění v CFD

Fyzikální model proudění je vždy patrný ze struktury rovnic. Tyto rovnice jsou většinou parciální diferenciální rovnice, jejich formulace se dělí na formulaci s časovou závislostí a bez časové závislosti. Společný znak je časový člen, jenž je většinou lineární a prvního řádu. Rovnice proudění mohou být lineární, nelineární a v závislosti na topologickém modelu jednorozměrné, dvojrozměrné a trojrozměrné.

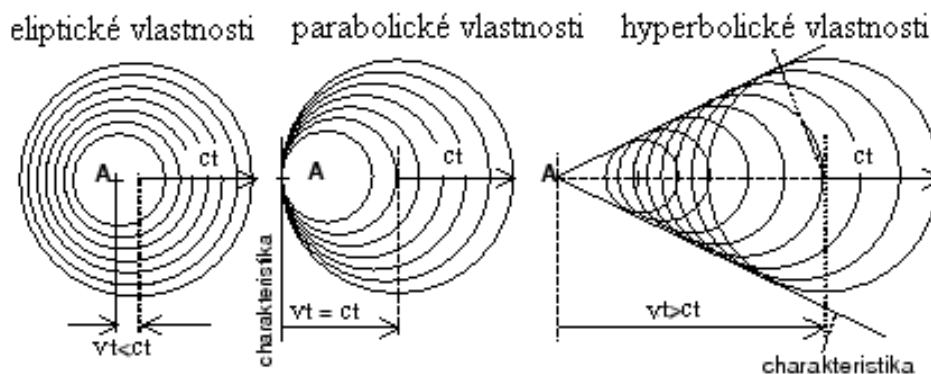
Pro řešení rovnic vyjadřujících fyzikální model proudění tekutiny je důležité jejich zařazení dle matematické klasifikace. Klasifikace probíhá z fyzikálního pohledu na základě šíření rozruchů závislé proměnné.

Jedná se o rozlišení na diferenciální rovnice typu:

- hyperbolického - úlohy transportu
- parabolického - úlohy transportu s difuzí, nestacionární vedení tepla
- eliptického typu - stacionární proudění tekutiny, stacionární vedení tepla (difuze), generování sítí

Každý typ rovnice vyžaduje jiný způsob řešení. V závislosti na typu rovnic se volí okrajové podmínky, algoritmus řešení a dají se posoudit i jejich podmínky řešitelnosti.

Na Obr. je znázorněno chování tekutiny v závislosti na vztahu rychlosti proudění  $c$  a rychlosti šíření rozruchu  $a$ .



Obr. 1 Chování tekutiny v závislosti na matematických vlastnostech určujících rovnic [3]

Klasifikaci diferenciálních rovnic lze provést i bez ohledu na fyzikální model. V případě parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu je možné klasifikovat rovnice na základě koeficientů při derivacích nejvyššího řádu nebo se pro klasifikaci používají charakteristiky.

### 2.1.2 Okrajové podmínky

Při řešení různých příkladů proudění tekutin jsou značné odlišnosti, ale vždy se vychází z níže uvedených určujících rovnic. Významným činitelem specifikujícím odlišné případy proudění

jsou okrajové podmínky, které určují konkrétní řešení. Zda simulace proudění v CFD programu odpovídá realitě, závisí z velké míry právě na okrajových podmínkách. Důležité je rozlišení viskózního a neviskózního proudění.

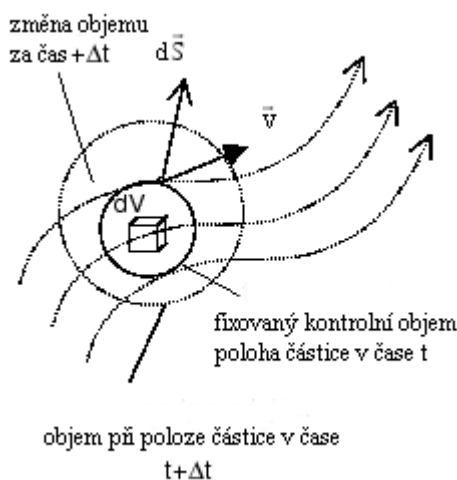
### 2.1.3 Rovnice kontinuity

Pro proudící tekutinu vyjadřuje rovnice kontinuity zákon zachování hmotnosti a formuluje se v integrálním nebo v diferenciálním tvaru.

Rovnice kontinuity v integrálním tvaru nezávisí na přírůstku času  $\Delta t$  a je vyjádřena pro kontrolní objem fixovaný v prostoru ( $dV$ ), přes který protéká tekutina.

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1)$$

Lze tedy říci, že v libovolném kontrolním objemu fixovaném v prostoru se musí časová změna hustoty tekutiny eliminovat tokem tekutiny přes stěny kontrolního objemu. Aby se výpočet integrálů co nejvíce zjednodušil, je vhodné podle toho volit kontrolní objem.



Obr. 2 Fixovaný kontrolní objem [3]

Rovnice kontinuity v diferenciálním tvaru je odvozena z integrálního tvaru. Rovnici kontinuity aplikujeme na velmi malý kontrolní objem ( $m \rightarrow dm$ ) a plošný integrál v rovnici je pomocí Gaussovy věty přepočítán na objemový integrál. Výsledný tvar je:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{v} = 0 \quad (2)$$

### 2.1.4 Pohybové rovnice

Pohybové rovnice proudící tekutiny se odvozují z Newtonova pohybového zákona a vyjadřují se v integrálním nebo diferenciálním tvaru.

Specifikace sil působících na kontrolní objem (pravá strana rovnice) je nutnou podmínkou k získání konečného vyjádření pohybové rovnice.

$$\iiint_V \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot d\vec{S}) = \sum_i \vec{F}_i \quad (3)$$

Pohybová rovnice v diferenciálním tvaru předpokládá velmi malý kontrolní objem ( $m \rightarrow dm$ ) a plošný integrál v rovnici je pomocí Gaussovy věty přepočítán na objemový integrál. Výsledný tvar je:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{v} \vec{v} = \rho \sum_i \frac{\vec{F}_i}{m} = \rho \sum_i \vec{f}_i \quad (4)$$

Specifické síly  $f$  se vztahují na jednotku hmotnosti tekutiny.

Po vyjádření sil, které ovlivňují pohyb proudící tekutiny (tlakové, třecí síly) dostaneme konečný tvar pohybové rovnice. Působení tlakových a třecích sil je vázáno na povrch kontrolního objemu. Gravitační síla, setrvačné síly, Coriolisovy síly jsou vázány na hmotnost částice tekutiny.

Povrchové síly, nebo také síly od tenzoru napětí, získáme prostřednictvím tenzoru napětí, kupříkladu v pravoúhlém souřadném systému:

$$T = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.1.5 Rovnice energie

V CFD aplikacích se hlavně uvažuje teplo, kinetická energie, geopotenciální energie a mechanická práce. Je možné zohlednit i jiné druhy energií, ale výše uvedené jsou dostačující.

Energie částice tekutiny  $dE$  je tedy vyjádřena součtem vnitřní energie  $dE_i$ , kinetické energie  $dE_k$  a geopotenciální energie  $dE_p$ :

$$dE = dE_i + dE_k + dE_p \quad (6)$$

Výsledný integrální tvar rovnice energie po odvození:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho e}{\partial t} dV + \iint_S \rho e (\vec{v} \cdot d\vec{S}) = \dot{Q} - \dot{W} \quad (7)$$

Nejčastější je v počítačové dynamice tekutin vyjádření celkové specifické energie pro termodynamicky ideální plyn za předpokladu, že změna potenciální energie je při proudění zanedbatelná vůči změně vnitřní a kinetické energie.

$$e = c_v T + \frac{v^2}{2} \quad (8)$$

Pokud se z kontrolního objemu nepřivádí (neodvádí) teplo ( $\dot{Q} = 0$ ) nebo se neodvádí práce ( $\dot{W} = 0$ ), je možná další specializace rovnice energie vyjádřením pravé strany rovnice.

Rovnice energie v diferenciálním tvaru předpokládá velmi malý kontrolní objem ( $m \rightarrow dm$ ) a plošný integrál v rovnici je pomocí Gaussovy věty přepočítán na objemový integrál. Konzervativní tvar rovnice energie je:

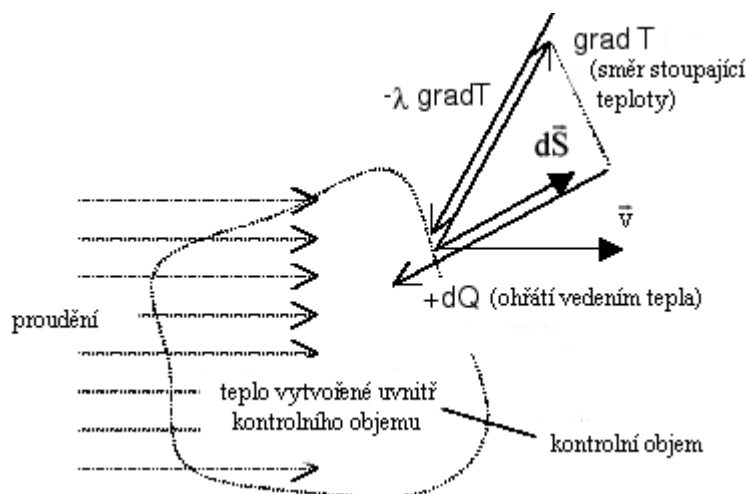
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \text{div} \rho e \vec{v} = \frac{\rho(\dot{Q} - \dot{W})}{m} \quad (9)$$

Na pravé straně rovnice energie se vyskytuje teplo a práce. Teplem je teplo přivedené  $Q > 0$  (odvedené  $Q < 0$ ) z kontrolního objemu přes povrch tohoto objemu a teplo vytvořené objemovým ohřevem.

$$d\dot{Q}_i = \rho \dot{q}_i dx dy dz \quad (10)$$

Vedení tepla v tekutině je přímo úměrné tepelné vodivosti  $\lambda$  a uskutečňuje se ve směru klesající teploty ( $-\text{grad}T$ ).

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T \quad (11)$$



Obr. 3 Model tepelného toku přes stěny kontrolního objemu [3]

Práce vnějších sil působících na kontrolní objem tekutiny se rovná skalárnímu součinu, kde záporné znaménko znamená, že síla je orientovaná proti rychlosti proudění a práce se bude z kontrolního objemu odvádět.

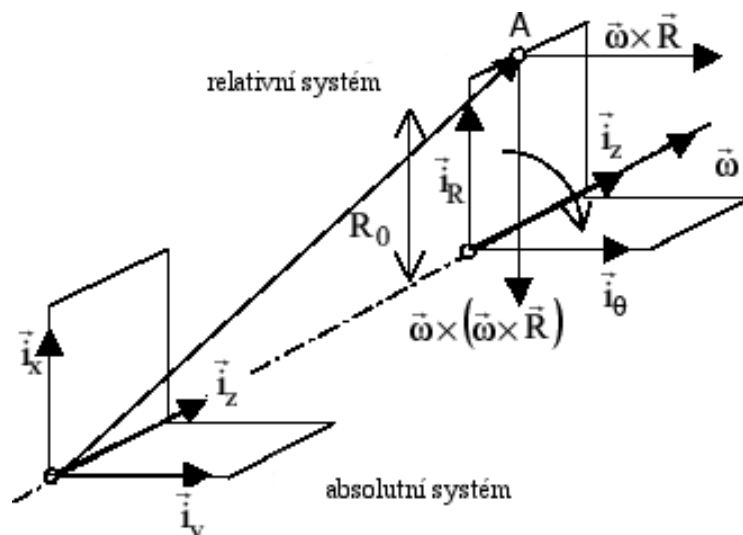
$$\dot{W} = - \sum_i \vec{F}_i \cdot \vec{v} \quad (12)$$

Pokud nemá skalární součin záporné znaménko, dochází k dodávání práce do kontrolního objemu a tato práce se mění na jiné formy energie.

## 2.2 Relativní proudění

Při výpočtech proudění v turbozařízeních, popř. proudění v zemské atmosféře musíme počítat s relativním pohybem tekutiny. Je tedy nutné zavést relativní souřadný systém pohybující se vzhledem k absolutnímu souřadnému systému. Obecně má pohyb souřadného systému složku

translační a rotační rotující okolo momentální osy rotace, ale v daných výše uvedených případech se jedná o rotaci souřadného systému okolo pevně stanovené osy. V relativním souřadném systému musíme také v rovnicích proudění zohlednit další objemové síly působící na jednotlivé částice tekutiny. Důležitá je také odlišnost vyjádření časových změn sledujících pohyb tekutiny, jelikož se pomocí těchto vyjádření odvozují určující rovnice proudění.



Obr. 4 Kinematické poměry v relativním souřadném systému otáčejícím s konstantní úhlovou rychlostí bez translačního pohybu [3]

Absolutní rychlost je v relativním souřadném systému vyjádřena:

$$\vec{v} = \vec{w} + \vec{\omega} \times \vec{R} = \vec{w} + \vec{u} \quad (13)$$

v ... absolutní rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
w ... relativní rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
ω ... úhlová rychlost	[s <sup>-1</sup> ]
u ... unášivá rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]

Rovnici kontinuity v relativním souřadném systému obdržím po výměně absolutní rychlosti c za relativní rychlost ω, jak pro integrální i diferenciální tvar.

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vec{\omega} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{\omega} = 0 \quad (15)$$

U pohybové rovnice v relativním souřadném systému na pravé straně rovnice přibývá Coriolisova a odstředivá síla. Coriolisova síla je výrazným činitelem ovlivňujícím proudění tlakových systémů v atmosféře Země a potažmo tak ovlivňuje počasí.

Integrální tvar:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho \vec{\omega}}{\partial t} dV + \iint_S \rho \vec{\omega} \vec{\omega} \cdot d\vec{S} = \sum_i \vec{F}_i - \iiint_V 2\rho \vec{\omega} \times \vec{\omega} dV - \iiint_V \rho \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}) dV \quad (16)$$

Diferenciální tvar:

$$\frac{\partial \rho \vec{\omega}}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{\omega} \vec{\omega} = \rho \left( \frac{\sum_i \vec{F}_i}{m} - 2\vec{\omega} \times \vec{\omega} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}) \right) \quad (17)$$

Časová změna celkové energie relativního souřadného systému je určující pro rovnici energie v relativním souřadném systému. Částice o hmotnosti  $dm$  má celkovou energii:

$$dE_{rel} = dm \left( c_v dT + \frac{\omega^2}{2} - \frac{u^2}{2} \right) \quad (18)$$

Časová změna specifické energie:

$$e_{rel} = c_v T + \frac{\omega^2}{2} - \frac{u^2}{2} \quad (19)$$

Integrální tvar rovnice energie pro relativní souřadný systém:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho e_{rel}}{\partial t} dV + \iint_S \rho e_{rel} (\vec{\omega} \cdot d\vec{S}) = \dot{Q} - \dot{W} \quad (20)$$

Diferenciální tvar rovnice energie pro relativní souřadný systém:

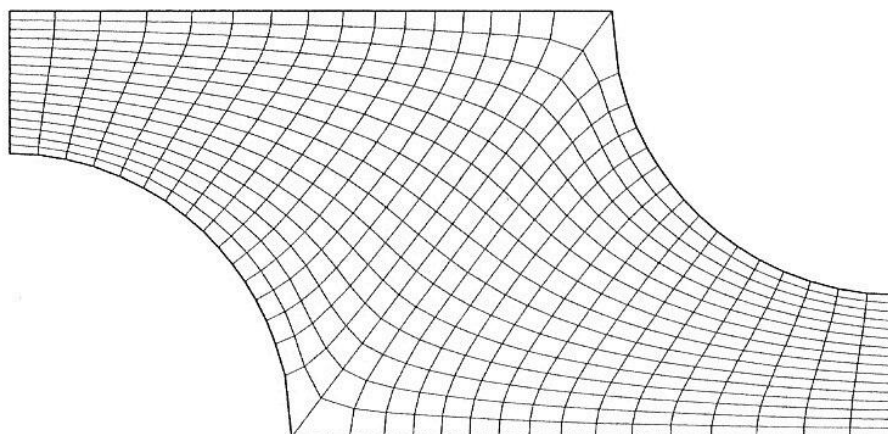
$$\frac{\partial \rho e_{rel}}{\partial t} + \text{div} \rho e_{rel} \vec{\omega} = \frac{\rho (\dot{Q} - \dot{W})}{m} \quad (21)$$

## 2.3 Diskretizace

Abychom mohli řešit určující rovnice CFD, je nutné, aby prostor pro numerické řešení těchto rovnic prošel diskretizací, tzn. byl pokrytý sítí bodů. Tato síť bodů může být:

a.) strukturovaná

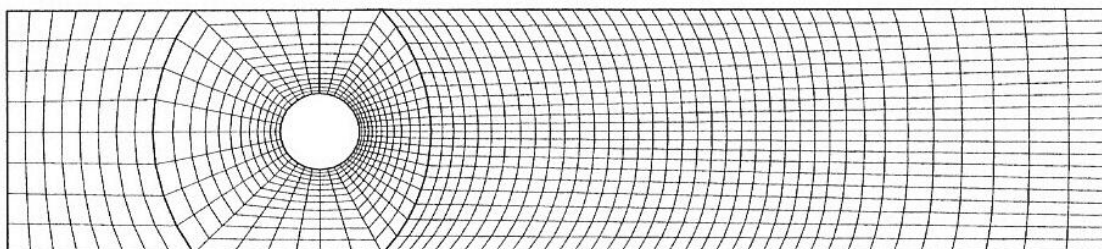
- nejjednodušší
- každý bod má čtyři sousedící body ve 2D, šest ve 3D
- podle tvaru čar sítě se dělí na typ H, O, C
- nevýhodná v případě složitých prostorů, kde způsobuje nepřesnosti ve výpočtu proudění
- další nevýhodou může být obtížná kontrola rozložení bodů sítě, tzn. vytvoření zbytečných malých prostorů



Obr. 5 Strukturovaná síť [1]

b.) blokově strukturovaná

- dvě úrovně řešení oblastí
- tzv. hrubá úroveň, kde jsou bloky poměrně velké části oblasti, jejich struktura může být nepravidelná, mohou se překrývat
- tzv. jemná úroveň, kde je definována síť uvnitř každého bloku
- zjemnění výpočetní sítě v místech s velkými gradienty rychlostního pole

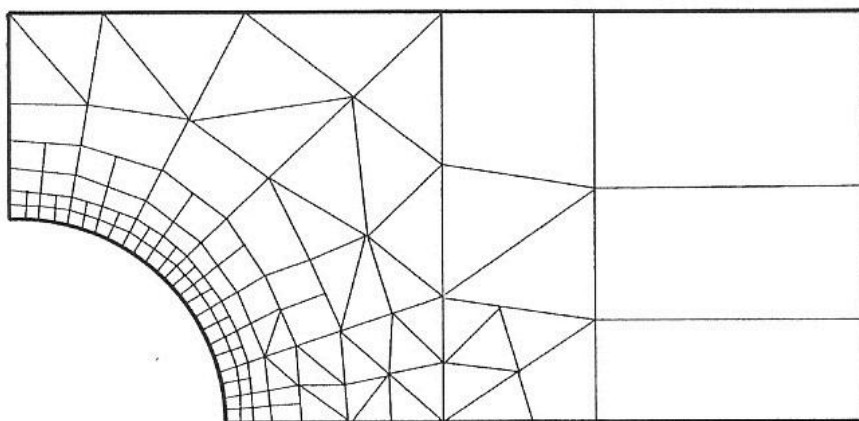


Obr. 6 Blokově strukturovaná síť [1]

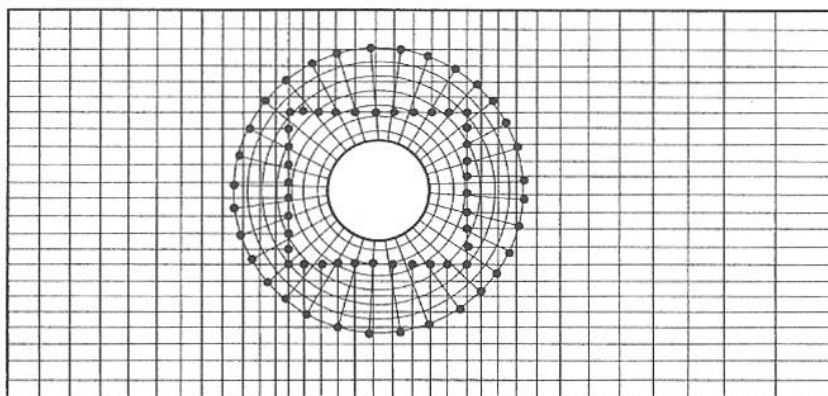
c.) nestrukturovaná

- nejvíce flexibilní
- určena pro velmi složitou geometrii
- nejlépe pro metodu konečných objemů a metodu konečných prvků
- síť je ve 2D tvořena trojúhelníky a čtyřúhelníky, ve 3D čtyřstěny a šestistěny
- složitější generování sítě, obtížnější preprocessing, pomalejší solving
- hybridní (kompozitní) síť - obsahuje různé typy prvků, překrývání sítí pro interpolaci okrajových podmínek na hranici oblasti, přechod mezi hybridními sítěmi zajišťují tzv. přechodové prvky (pyramidové, čtyřstěnné), zajišťuje dostatečné množství elementů v mezní vrstvě, šetří prvky, zrychluje tvorbu sítě





Obr. 7 Nestrukturovaná síť [1]



Obr. 8 Kompozitní síť [1]

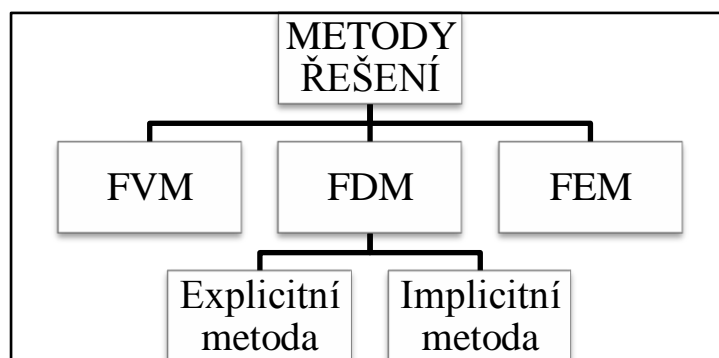
Diskretizace ohraničeného prostoru proudění umožňuje přepsání rovnic proudění na odpovídající algebraické rovnice, které získáme vyjádřením derivací či integrálů pomocí funkčních hodnot v bodech diskretizace a nahrazením konečnými součty. Výsledkem diskretizace je tedy systém algebraických rovnic, které jsou buď lineární, nebo nelineární.

To závisí na povaze parciálních diferenciálních rovnic, z kterých jsou algebraické rovnice derivovány. Základem pro tvorbu programu řešení je vypracování algoritmu řešení algebraických rovnic, který musí být stabilní.

## 2.4 Metody řešení rovnic v CFD

V CFD se většinou řeší určující rovnice proudění v integrálním tvaru, kdežto v mechanice tekutin se dává přednost diferenciálnímu tvaru.

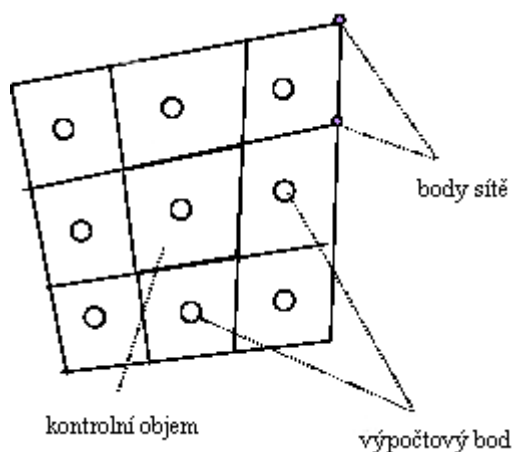
V případě diskretizace ohraničeného prostoru proudění strukturou konečného počtu uzlových bodů je možné řešit určující rovnice proudění pomocí tří metod.



Obr. 9 Hlavní metody řešení rovnic v CFD

a.) FVM (Finite Volume Method) - metoda konečných objemů

- kontrolní objem (buňka ve tvaru čtyřúhelníka) definují body sítě v prostoru
- kontrolní objem představuje sama buňka nebo více buněk
- výpočtový bod v kontrolním objemu reprezentuje celou buňku
- na výpočtový bod se aplikují určující rovnice (integrální tvar)



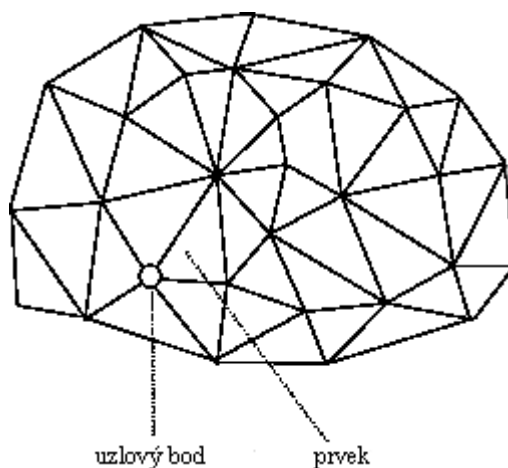
Obr. 10 FVM - rozdělení oblasti na kontrolní objemy [3]

b.) FDM (Finite Difference Method) - metoda konečných diferencí

- použití jen pro strukturované sítě
- řešení určujících rovnic v diferenciálním tvaru v síti bodů proudového pole
- každý výpočtový bod musí mít v struktuře sítě jednoznačně přiřazené sousední body
- numerické vyjádření rovnice ovlivňuje další rozdělení FDM
- explicitní metoda - přímé vyjádření časového přírůstku závislé proměnné, jednoduché programování, delší čas výpočtu
- implicitní metoda - přírůstek je řešením systému lineárních algebraických rovnic, složitější programování, rychlejší výpočet, větší chyby výpočtu

c.) FEM (Finite Element Method) - metoda konečných prvků

- zdokonalené FDM
- vyvinuté pro řešení všeobecných úloh pevnostní analýzy
- místo buněk použití prvků (jedno, dvoj, trojrozměrné)
- velmi podobná metodě FVM z hlediska použití prvků - buněk
- uzlové body na typických místech prvku
- interpolační struktury pro zajištění závislosti uzlových bodů



Obr. 11 FEM - rozdělení oblasti 2D prvky [3]

Dále můžeme CFD metody pro výpočet proudění rozdělit podle obtížnosti:

a.) lineární metody - Vortex Lattice, Panel Methods

b.) nelineární metody

- neviskózní proudění - Eulerovy metody
- viskózní ustálené proudění - RANS metody (Reynolds Averaged Navier-Stokes)
- viskózní neustálené proudění - LES metody (Large Eddy Simulation)  
- DNS metody (Direct Numerical Simulation)

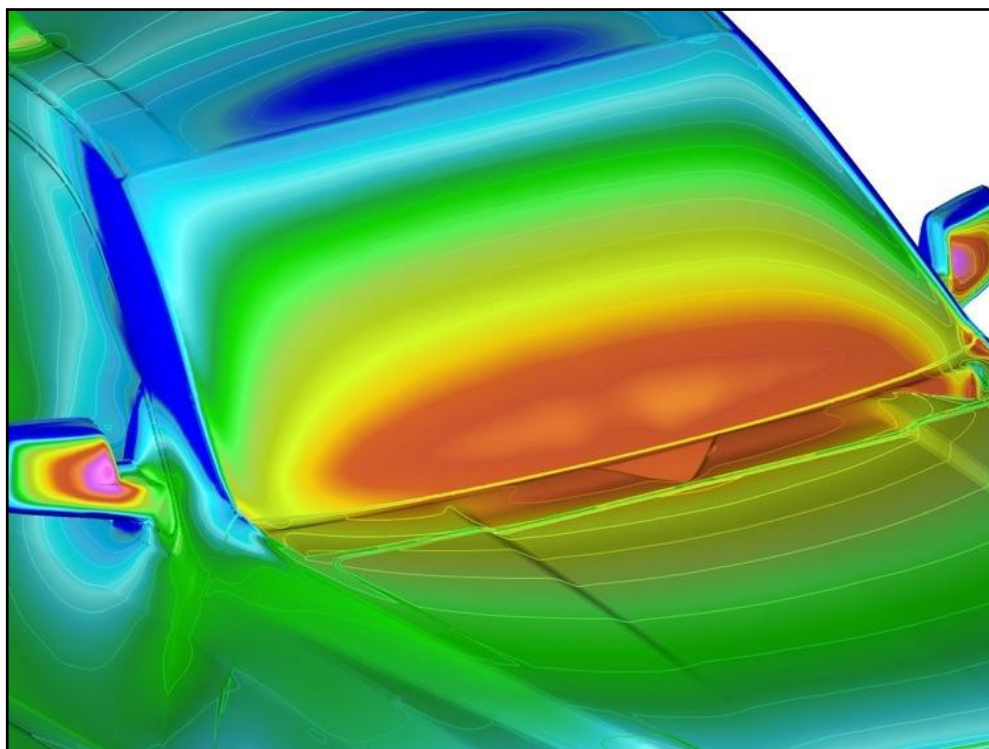
V případě viskózního proudění se počítačové řešení určujících rovnic označuje jako DNS (Direct Numerical Simulation), řešení při simulaci velkých vířivých proudů je označováno jako LES (Large Eddy Simulation) a pokud se systém rovnic zjednoduší Reynoldsovým zprůměrováním, označují se tyto rovnice RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

## 2.5 Interpretace výsledků

Základními možnostmi pro vizualizaci dat jsou:

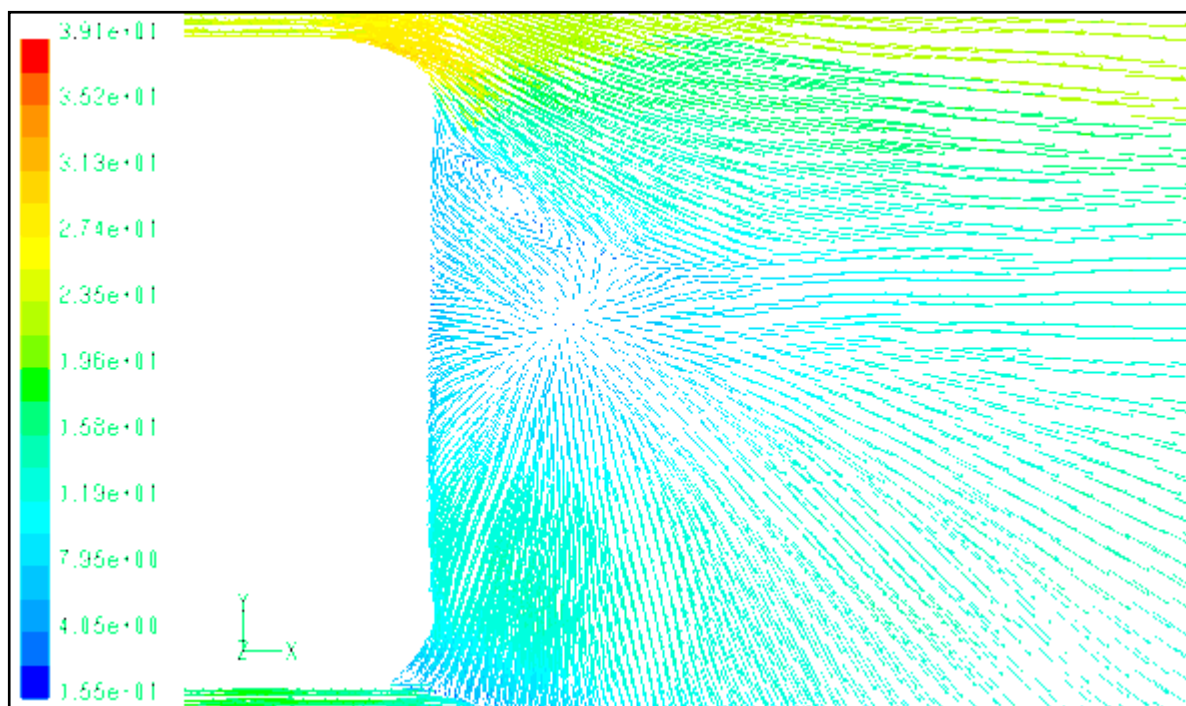
- grafy

- izočáry



Obr. 12 Isočáry tlaku [16]

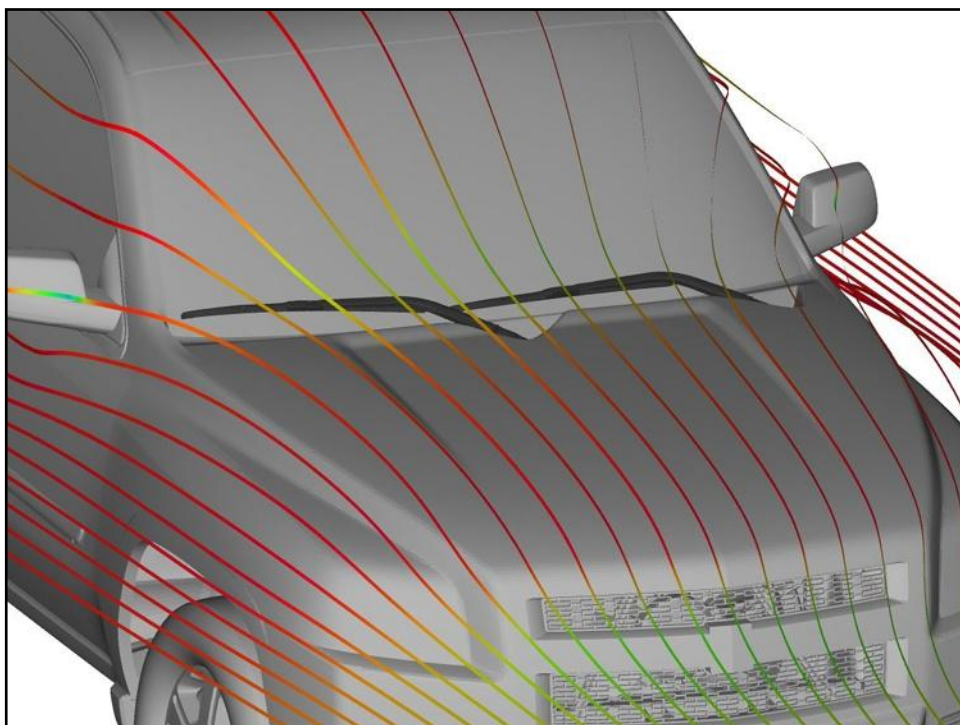
- vektory rychlosti



Obr. 13 Vektory rychlosti [15]

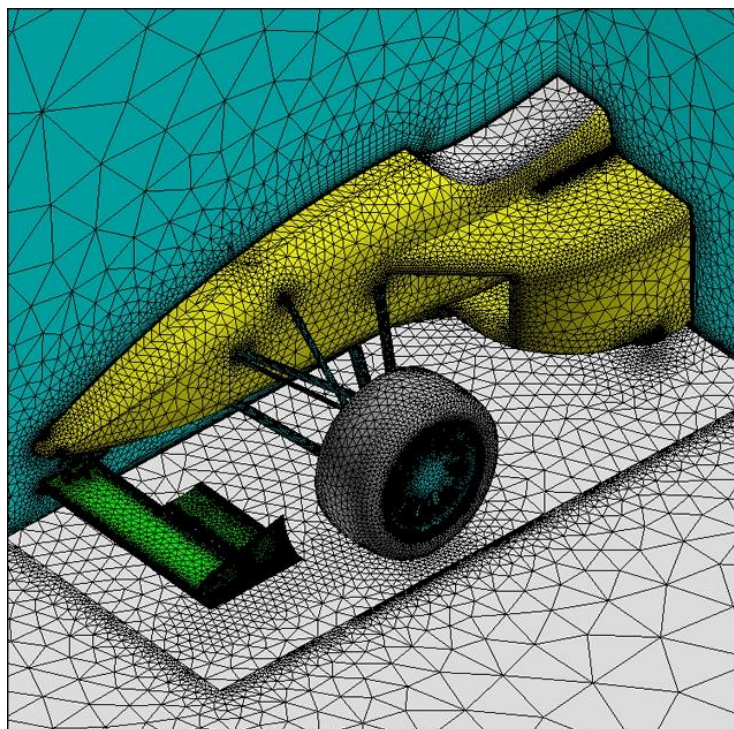


- proudnice



Obr. 14 Proudnice rychlosti [16]

- zobrazení sítě



Obr. 15 Zobrazení hybridní sítě [27]

- kompozice a animace



Obr. 16 Dragster s proudnicemi rychlosti [16]

## 2.6 Simulace turbulence v CFD

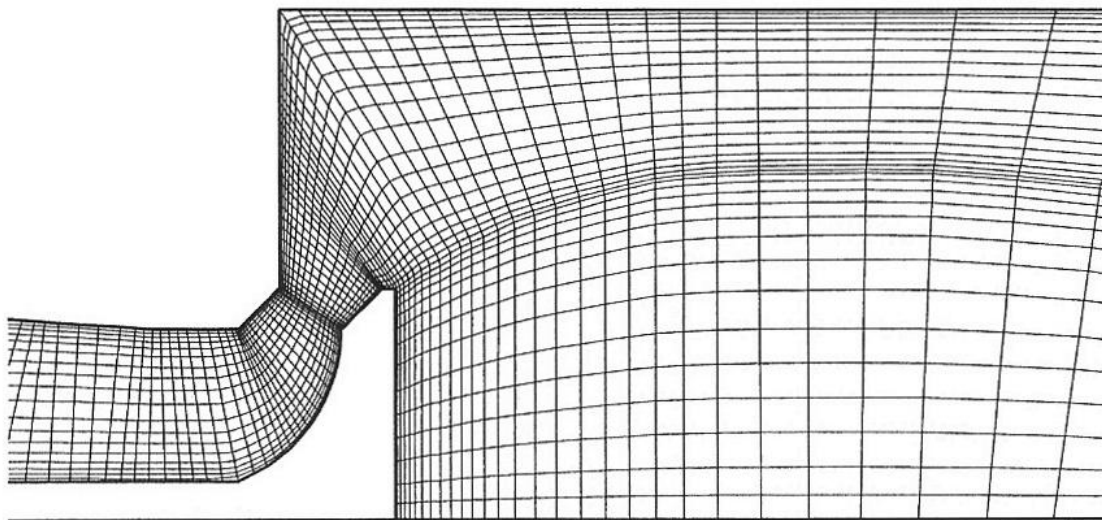
U proudění tekutin převládá turbulentní proudění. Turbulence vzniká hlavně při obtékání stěn viskózní tekutinou, v úplavu za tělesem, při vytékání proudu do tekutiny a při mísení proudů. Pro turbulentní proudění platí obecně Navier-Stokesovy rovnice, které vyjadřují proudění viskózních tekutin, přičemž k řešení turbulence se dá využít tří metod.

První metodou, která je vhodná pro řešení turbulence je metoda DNS, která simuluje proudění v prostoru i čase. Pomocí této metody lze simulovat všechny vířivé proudy. Přímá numerická simulace nevyžaduje zjednodušený model proudění, proto je tato metoda označována jako nejjednodušší pro simulaci turbulentního proudění. Pro výpočet touto metodou je zapotřebí velký počet výpočtových bodů.

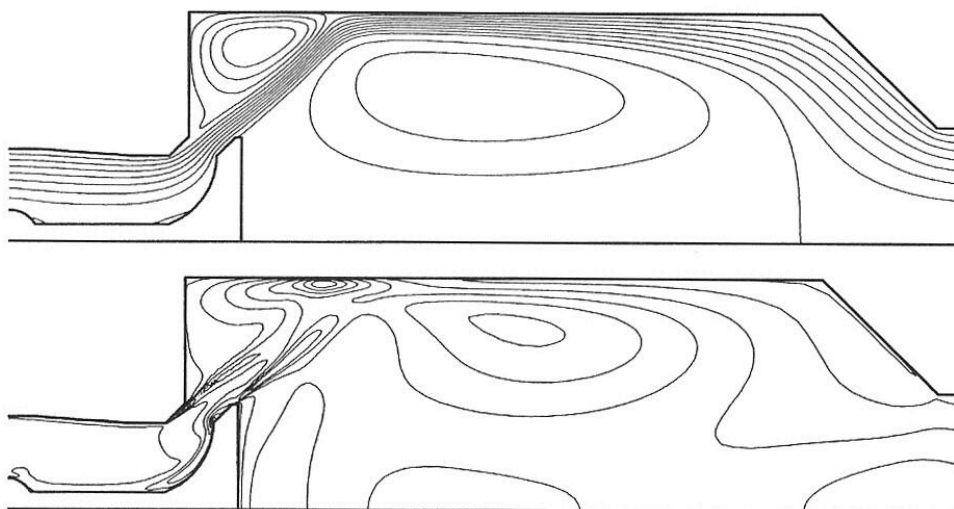
Další metodou je metoda LES, která je vhodná pro simulaci velkých vírů, které jsou hlavními nositeli turbulentní energie. Malé víry se modelují, tudíž vzdálenost bodů potřebných pro výpočet je podstatně větší oproti charakteristickým rozměrům. Tato metoda je méně náročná oproti metodě DNS z hlediska kapacity počítače, časové kroky jsou větší a proto je možné provádět výpočty pro větší Reynoldsova čísla.

Poslední je metoda RANS, kdy se zjednoduší systém Navier-Stokesových rovnic Reynoldsovým zprůměrováním. Úprava Navier-Stokesových rovnic je založena na rozložení všech fyzikálních veličin na časově střední hodnotu a flukтуаční hodnotu, na výpočtu časového průměru všech členů rovnice a na rozlišení stlačitelnosti (nestlačitelnosti) proudění.

Pro řešení zprůměrovaných Navier-Stokesových rovnic je třeba vytvoření modelu turbulence. V praxi je nejběžnější a také nejúspěšnější  $k-\varepsilon$  model, který charakterizuje velikost energie ve velkých vírech. Příklad aplikace pro  $k-\varepsilon$  model je na Obr. 17 a Obr. 18.



Obr. 17 Síť pro výpočet proudění kolem ventilu [1]



Obr. 18 Vypočtené proudnice (nahore) a vrstevnice kinetické energie (dole) při proudění kolem ventilu [1]

### 3. CFD programy

V dnešní době je opravdu široká nabídka CFD programů (CFD kódů). Tyto programy se dělí podle rozsahu programu na programy pro komplexní řešení, tzn. obsahující nástroje pro preprocesing, solving i postprocesing, programy zaměřené převážně na vygenerování sítě, programy pro vizualizaci výpočtů a programy pro systémy. CFD programy lze také dělit dle distribuce na komerční a na volně dosažitelné. Dále se budu zabývat pouze programy komerčními.



## 3.1 Komplexní řešení

### 3.1.1 ANSYS CFX

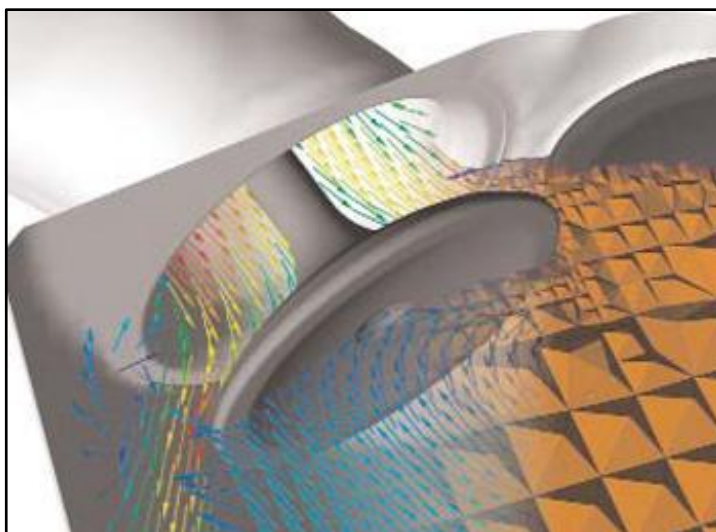
Program ANSYS CFX je výkonný, pružný a univerzální nástroj určený pro řešení problematiky CFD. Umožňuje řešení úloh v jejich plné šíři, přičemž k dispozici je rozsáhlá nabídka fyzikálních modelů pro použití v nejrůznějších oblastech průmyslu (letectví, automobilní inženýrství, stavební průmysl, chemický průmysl, elektronika, lodní průmysl, turbozařízení,...) a aplikací (proudění, přenos tepla a hmoty, chemické reakce, spalování). Tento program lze užívat v prostředí ANSYS Workbench, díky kterému je pak možné sdílení informací, dat a výsledků mezi jednotlivými produkty firmy ANSYS.

Specifické vlastnosti programu ANSYS CFX:

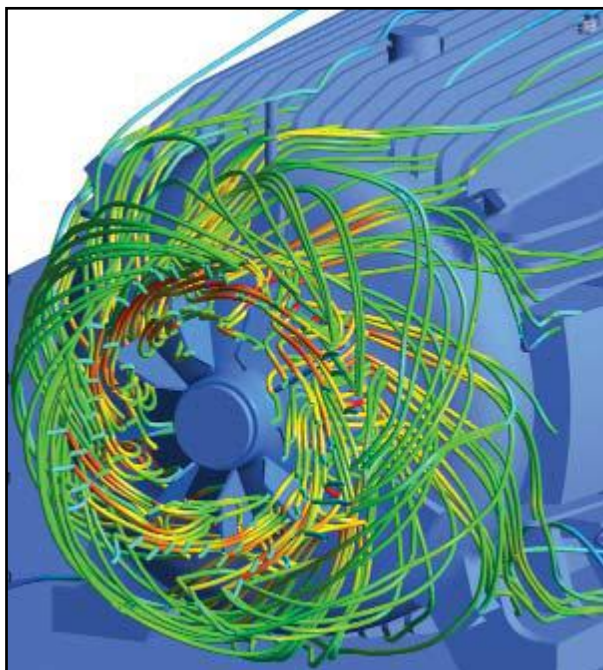
- vlastní příkazový jazyk CCL (CFX Common Language) pro definování uživatelských funkcí, užívá se při vytváření vlastních modelů
- většinu fyzikálních modelů lze vzájemně kombinovat pro všechny typy elementů a přes všechny typy vzájemného napojení mřížek
- použití diskretizačních schémat druhého řádu pro libovolný fyzikální model (základní nastavení)
- interaktivní algebraická multi-grid (všechny proměnné se počítají v jedné matici)
- vícefázové modelování - modely pro proudění s pevnými částicemi, bublinami, kapičkami, modelování volné hladiny, kavitace, modelování varu, kondenzace
- modely turbulence standardní i vlastní
  - Menter-Langtry  $\gamma$ - $\theta$  model - model turbulence, který modeluje přechod mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou (letectví, lopatkové stroje)
  - Scale Adaptive Simulation - model turbulence pro nestacionární proudění, rychlejší výpočet úloh náročných na čas i kapacitu počítače (akustika)
- přestup tepla
  - přímé určení přestupu tepla jako součást výsledků z proudové analýzy a přenesení hodnot do strukturálního výpočtu bez nutnosti stejné mřížky na rozhraní obou analýz
  - sdružený výpočet pro zjištění šíření tepla v pevném tělese nebo šíření tepla z pevného tělesa do proudové oblasti
- radiace - modely pro popis přestupu tepla radiací (P1, Rosselandův model, „Discrete Transfer“, „Monte Carlo“) od transparentních po částečně neprůhledné materiály (spalování, klimatizace, radiace skrz pevná tělesa)
- spalování
  - všechny složky chemického a proudového pole jsou počítány v jediné matici (rychlá konvergence)
  - rozsáhlá knihovna chemických reakcí (jedno a víceukrokový „Eddy Dissipation Model“, model spalování „Probability Density Function“, modelování emisí)
  - modely spalování pro vícefázové proudění (kapalná paliva, spalování uhlí)
- možnost předepsání deformace mřížky podle zadaných parametrů (pohyb pístu) nebo aktuálně vypočtených hodnot
- všechny fyzikální modely jsou plně paralelizované, pro velké úlohy lze využít paralelního výpočtu na homogenní nebo heterogenní síti
- CFX-Post (postprocesing)



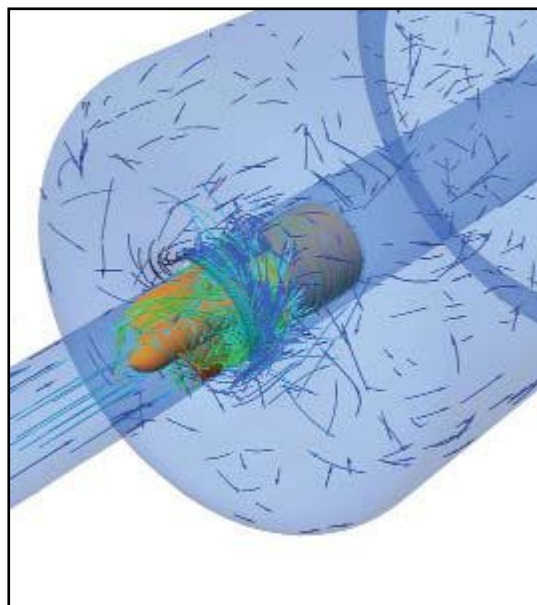
- vizualizační nástroje ( izoplochy, proudnice, vektory, ..)
- integrální výpočet zvolených proměnných, vytváření vlastních proměnných, interpolace proměnných na rozdílnou mřížku, tvorba maker, zpracování výsledků pomocí grafů a tabulkového editoru
- automatizovaná generace zpráv plně nastavitelná uživatelem
- možnost plně automatizovat zpracování výsledků (vlastní typy zpráv, maker, zobrazení nebo grafů)
- zpracování CFD i FSI analýz v rámci programů firmy ANSYS



Obr. 19 ANSYS CFX - Sání do válce [19]



Obr. 20 ANSYS CFX - Elektrický motor [19]



Obr. 21 ANSYS CFX - Srdeční pumpa [19]

### 3.1.2 FLUENT

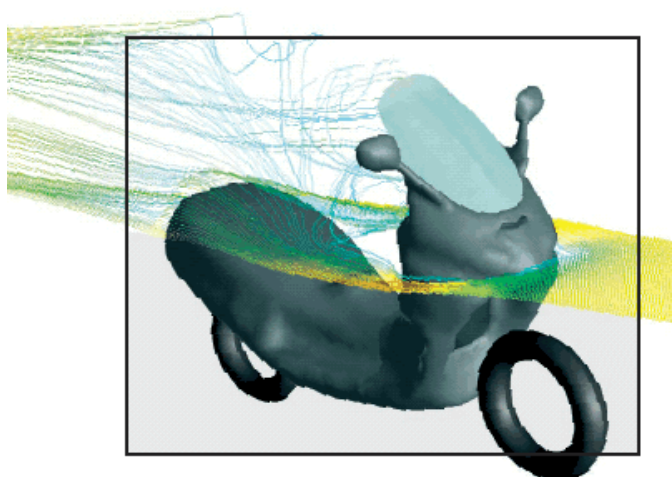
Program FLUENT je produktem firmy ANSYS a je jedním z nejrozšířenějších na poli CFD. Stejně jako ANSYS CFX je to univerzální a flexibilní nástroj nabízející mnoho fyzikálních modelů využitelných v nejrůznějších aplikacích. Program je vhodný pro řešení úloh z oblasti proudění, přenosu tepla a spalování. Umožňuje řešení jak vnitřního tak i vnějšího obtékání v laminárních i turbulentních oblastech, vícefázového proudění a proudění s volnou hladinou. Tento CFD program se užívá zejména v leteckém a automobilovém průmyslu (aerodynamika, simulace havárií, atd.), energetice, turbinářství, vodohospodářství, v chemickém inženýrství, technice prostředí a v oblasti procesního a ekologického inženýrství.

Specifické vlastnosti programu FLUENT:

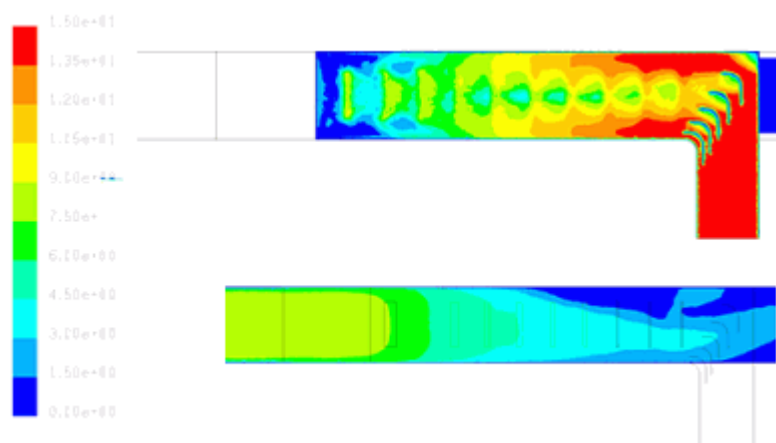
- řešení stacionárních a nestacionárních Navier-Stokesových rovnic metodou konečných objemů
- řešení prováděno adaptivními multigrid metodami
- modely turbulence: mixing-length, Spalart-Allmaras, k- $\epsilon$ , RNG k- $\epsilon$  (Renormalization Group), RSM (Reynolds Stress Model)
- modelování mísení směsí s chemickými reakcemi nebo bez
- chemické reakce a spalování
  - řízeny pomocí PDF (Probability Density Function), Premixed modelu nebo uživatelsky definovanými rychlostmi reakcí
  - program prePDF pro definování vlastností chemických směsí a reakcí
- možnost modelování všech druhů vícefázového proudění (kapky, bubliny)
- proudění s volnými povrchy
- pohyb disperzní fáze se zahrnutím vlivu turbulence
- proudění v prostředích s distribuovanými odpory (porézní materiály, filtry atd.)
- modely pro přenos tepla zahrnující vedení tepla, přirozenou i vynucenou konvekci a radiaci
- výpočty zavířených proudění, proudění v rotujících soustavách a interakce pohyblivých a nepohyblivých soustav
- hotové diskrétní modely pro ventilátory, čerpadla, radiátory a výměníky tepla
- možnost definování uživatelských funkcí a vytváření vlastních fyzikálních modelů
- možnost paralelního procesingu (paralelní běh pro systémy se sdílenou i distribuovanou pamětí, metody rozdělování oblastí (Domain Decomposition Methods), nástroje pro rozdělení, balancing a optimalizaci)
- postprocessing
  - vizualizační nástroje (kontury, vektory rychlostí, proudnice, řezy, animace)
  - export výsledků ve formátech pro další zpracování (ASCII, AVS, Data Explorer, EnSight, FAST, FieldView, TECPLOT)
  - export dat pro MKP analýzu (Abaqus, ANSYS, COSMOS, I-DEAS, NASTRAN, PATRAN)
  - formát CGNS pro výměnu dat mezi CFD programy



Obr. 22 FLUENT - proudnice kolem automobilu [19]



Obr. 23 FLUENT - horizontální proudnice kolem skútru [19]



Obr. 24 FLUENT - Řešení větrání automobilového tunelu [31]

### 3.1.3 POLYFLOW

POLYFLOW je nástroj firmy ANSYS a je ideální pro analýzu výroby polymerů, tvarování skla a jiných výrobních procesů na poli materiálů.

Specifické vlastnosti programu:

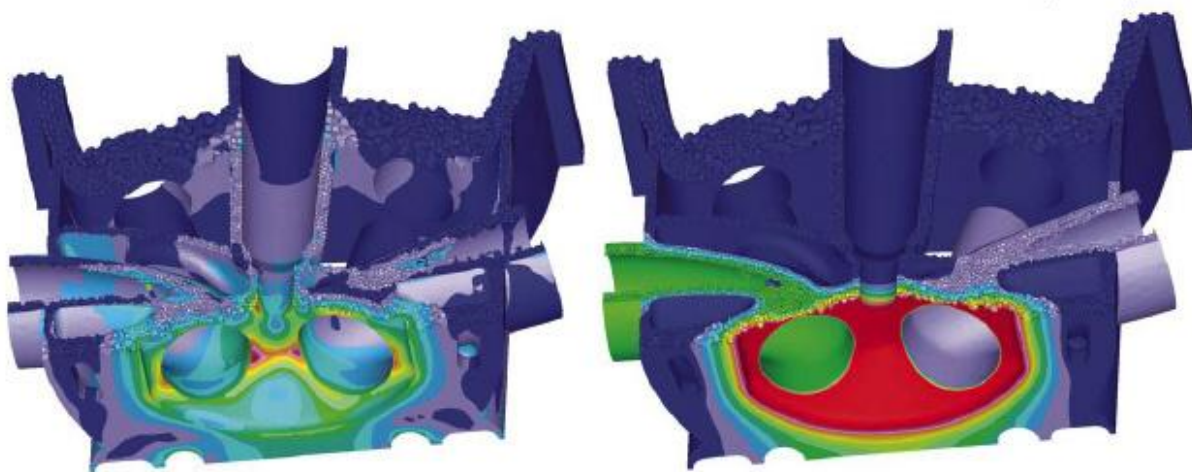
- rozsáhlá knihovna viskoelastických modelů
- modelování volné hladiny
- interakce pevná - kapalná fáze

### 3.1.4 FloWizard

Produkt firmy ANSYS, který je určen pro rychlou simulaci proudění umožňující analýzu proudění již při návrhu výrobku. Celým procesem provádí uživatele inteligentní software, který hlídá vstupní data, sporné výsledky a podává návod jak vše opravit. Zajímavá je vlastnost, kdy může uživatel sdílet úlohu přes intranet nebo přesunout náročný výpočet na simulační server. FloWizard je plně kompatibilní s programem FLUENT.

### 3.1.5 STAR-CD

Všestranný nástroj firmy CD-adapco, který je schopen simulací mechaniky kontinua. Výpočty pevné a tekuté fáze jsou prováděny současně na jedné výpočetní síti, která představuje rozhraní mezi jednotlivými materiálovými oblastmi za užití shodného rozhraní, což znamená, že oblasti řešení jsou vázány implicitně bez mapování a interpolací. Program je vybaven množstvím fyzikálních modelů umožňujících simulaci problémů zahrnujících přenos tepla, spalování, turbulenci atd. Verze STAR-CD V4 obsahuje nejmodernější přístup k modelování volné hladiny a nabízí možnost modelování změny fáze během kavitace, varu nebo kondenzace. Výhodou programu je oprava geometrie a automatické generování sítě.



Obr. 25 STAR-CD - předpokládané tepelné namáhání (vlevo)  
teplotní vrstevnice v hlavě válce motoru (vpravo) [30]

### 3.1.6 CFD-ACE+

Program firmy ESI GROUP je určen pro komplexní simulaci pomocí jednoho nástroje. Program je nabízen v základní verzi zahrnující proudění, přenos tepla a turbulenci. Dále je možné si doplnit program o nadstavbu např. pro biomechaniku, polovodiče, plasmu,

mikroelektromechaniku a pro letectví a kosmonautiku. CFD-ACE+ je ve velké míře užíván také v oblasti automobilního inženýrství.

### 3.1.7 CFD-FASTRAN

Program firmy ESI GROUP je vytvořen speciálně pro letecký a kosmický průmysl, pro aplikace aerodynamiky a aerothermodynamiky. Program simuluje např. vypuštění rakety nebo dynamiku letu obecně.

### 3.1.8 Cfdesign

Tento program se vyznačuje nenáročností na znalosti uživatele. Jednoduchý je i import geometrie z CAD programů. Další výhodou je interakce, kdy změna provedená v programu Pro/ENGINEER je provedena v programu Cfdesign.

### 3.1.9 FLOTHERM

Program firmy FLOMERICS, který řeší proudění vzduchu a přenos tepla v okolí elektronického zařízení. Využití v oblastech počítačů, telekomunikačního zařízení, spotřební elektroniky, v oblasti automobilové techniky, atd.

### 3.1.10 FLOVENT

FLOVENT je dalším produktem firmy FLOMERICS určeným výhradně pro simulaci proudění a přenosu tepla uvnitř a vně budov všech typů a velikostí. Kromě řešení proudění uvnitř a okolo budov jej lze využít pro simulaci proudění uvnitř vozidla

## 3.2 Vytvoření sítě

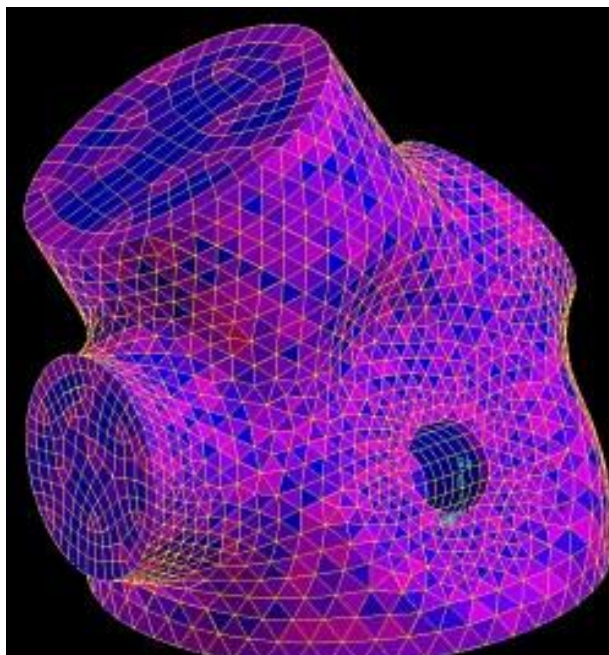
### 3.2.1 GAMBIT

GAMBIT je software firmy ANSYS. Je určen pro program FLUENT jako komplexní preprocesor, s jehož pomocí je vytvořena jak geometrie, tak vygenerována síť. GAMBIT je díky svým vlastnostem jedním z nejrychlejších a nejjednodušších preprocesorových nástrojů.

Specifické vlastnosti programu GAMBIT:

- pokročilé nástroje pro editaci příkazů - současná editace a přehrávání příkazů, vytváření skriptů pro parametrické studie
- poloautomatické nástroje pro opravu importované geometrie (tzv. čištění geometrie od děr, přesahujících ploch, ostrých rohů)
- parametrizace modelu
- rychlá a jednoduchá automatická i parametrická generace všech typů sítí včetně přechodových vrstev a hybridních sítí
- nástroje pro plošné a prostorové zahušťování sítí v kritických oblastech
- nástroje na vyšetřování kvality výpočetní sítě
- snadná výměna informací s CAD systémy (import geometrie z CATIA, Pro/ENGINEER)





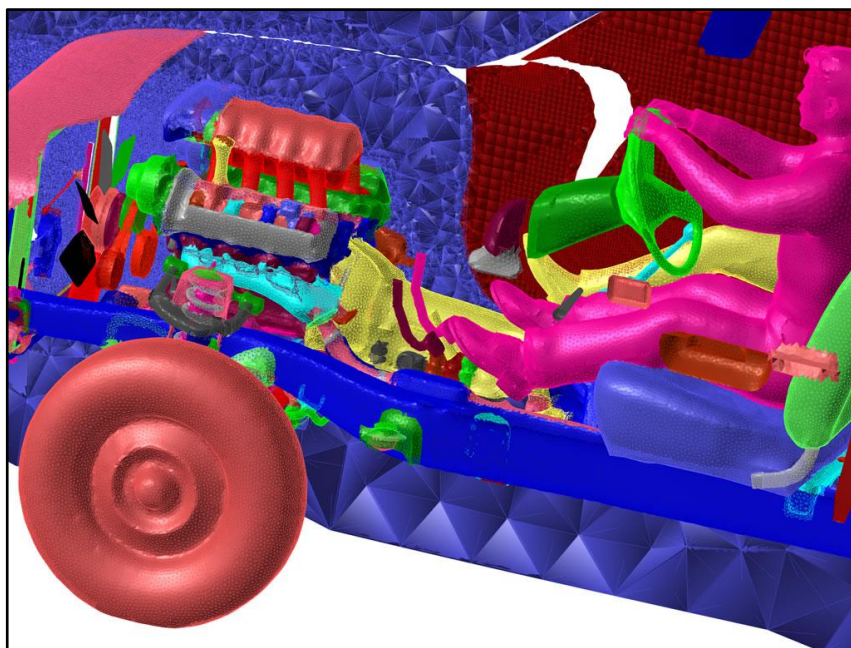
Obr. 26 GAMBIT - objemová síť [19]

### 3.2.2 Tgrid

Tgrid je preprocesor firmy ANSYS určený pro generování sítě umožňující opravu sítí a vytváření hybridních a nestrukturovaných objemových sítí. Preprocesor vytváří dokonalé sítě pro FLUENT a šetří čas.

Specifické vlastnosti programu Tgrid:

- rychlá automatická tvorba hybridních sítí (obsahující různé typy prvků - čtyřstěny, pětistěny, šestistěny)
- přechod mezi sítěmi zajištěn vrstvou přechodových prvků (pyramidové, čtyřstěnné prvky)
- nástroje pro opravu a vylepšení mezní vrstvy
- nástroje pro prověřování velikosti a kvality sítě
- možnost nekonformního rozhraní (virtuální návrh prototypů)
- parametrická změna rozměrů dané oblasti a napojení na zbývající část
- snadná výměna informací s ostatními CAD systémy (ANSYS, CATIA, I-DEAS, NASTRAN, PATRAN, Pro/ENGINEER)
- importace plošné sítě z GAMBITU a dalších preprocesorů



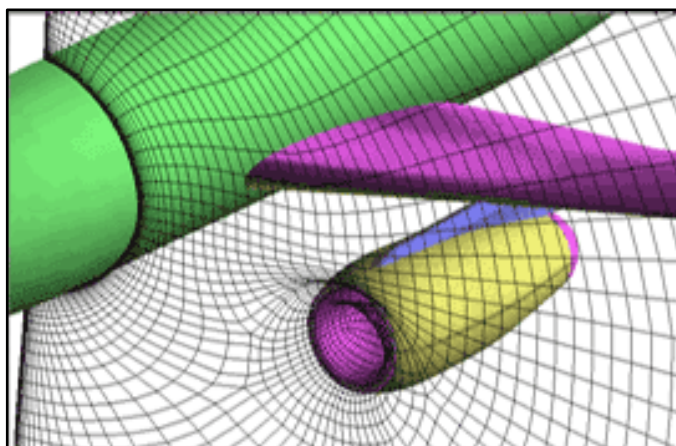
Obr. 27 Tgrid - síť nákladního vozu [19]

### 3.2.3 GridPro

Tento generátor sítí je automatický, vytváří vysoce kvalitní sítě a je založen na výkonném topologickém nástroji. Je užíván pro aplikace automobilního a leteckého průmyslu, kosmonautiky, chemického průmyslu, turbozařízení a biomechaniky.

Specifické vlastnosti programu GridPro:

- objektově orientovaný, multiblokový
- jednoduchost a rychlost (není potřeba tolik vstupních dat)
- expertní systém zabráňující uživateli dělat chyby
- vstupem jsou neořezané plochy
- modulární parametrické studie (snadné vytváření sítě při změně modelu)
- spolupráce se všemi hlavními CAD systémy



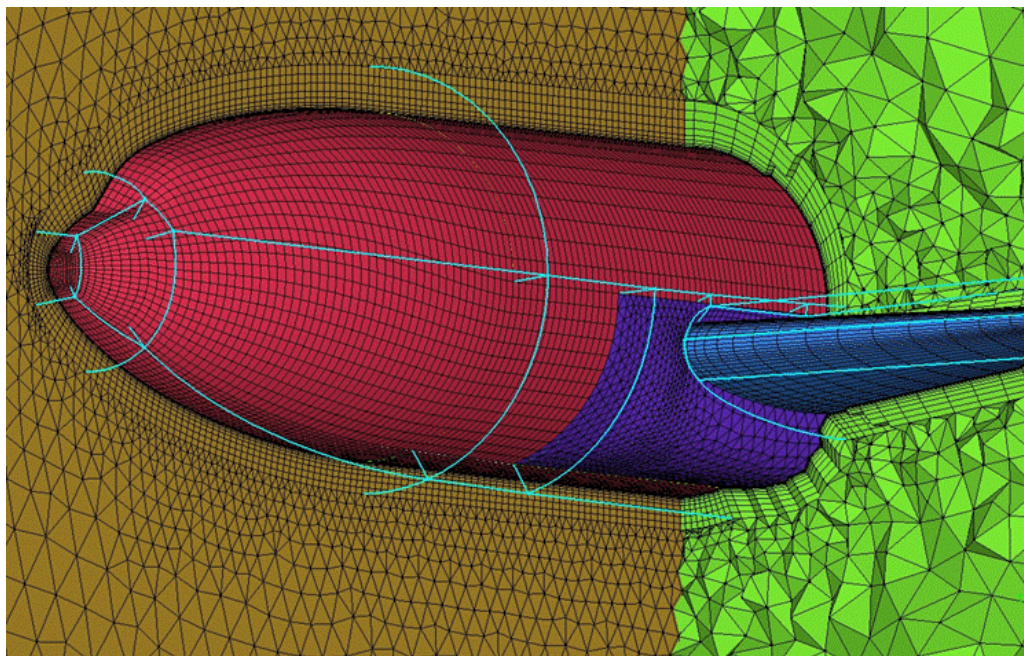
Obr. 28 GridPro - airbus [26]

### 3.2.4 ANSYS ICEM CFD

Program firmy ANSYS určený pro generování a úpravu sítě vybavený sofistikovaným importem geometrie. Mimo jiné umožňuje také postprocessing. ICEM CFD je univerzální preprocesor pro analýzy FEA, CFD a CAE.

Specifické vlastnosti programu:

- vysoká tolerance nedokonalostí importovaných dat
- oprava importovaných dat
- vytvoření jakékoli sítě
- kompletní práce se sítí (diagnostika, zahuštění, zřed'ování, vyhlazování)
- schopnost práce s již existujícími sítěmi
- více než sto formátů rozhraní

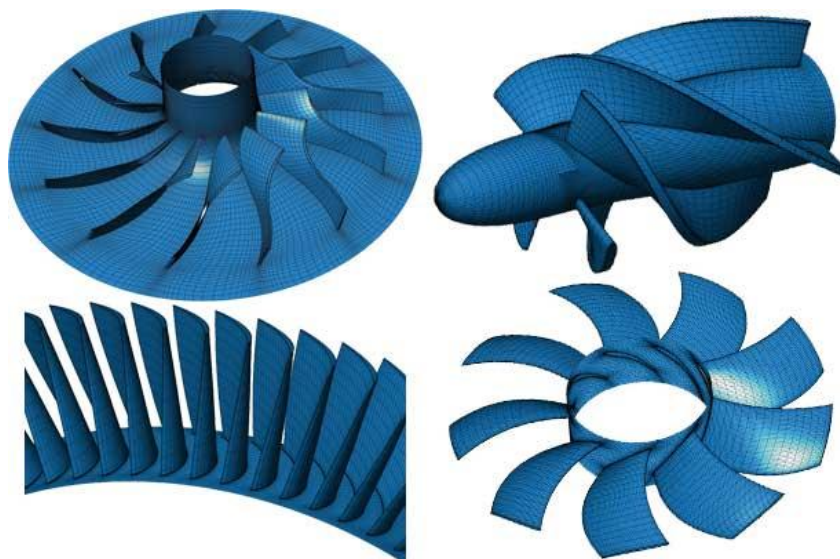


Obr. 29 ANSYS ICEM CFD - Multizone síť [19]

### 3.2.5 ANSYS TurboGrid

Automatický generátor sítě pro turbozařízení vytvářející vysoce kvalitní hexaedrální síť. Je nedílnou součástí systému firmy ANSYS pro rotující zařízení, která také zahrnuje ANSYS BladeModeler (tvorba lopatek), ANSYS CFX (simulace proudění), ANSYS Mechanical a ANSYS Fluid Structure Interaction.

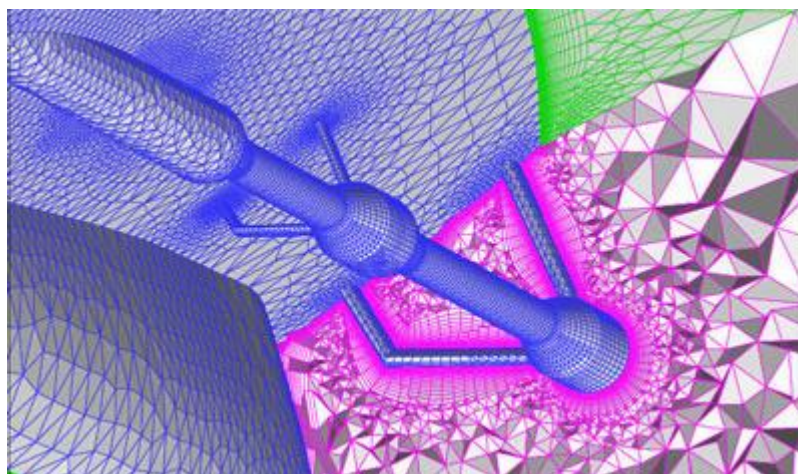




Obr. 30 ANSYS TurboGrid [19]

### 3.2.6 Centaur

Program firmy Centaur Software generující hybridní síť vysoké kvality. Je automatický a nenáročný na znalosti uživatele. Program je užíván např. v oblastech automobilního a leteckého průmyslu, lodního průmyslu, biomechaniky a turbozařízení. Spolupráce s programy: AutoCAD, Pro/ENGINEER, CATIA, FLUENT, Star-CD, Tecplot,



Obr. 31 Centaur - trup lodi [27]

### 3.2.7 CFD-GEOM a CFD-VISCART

Produkty firmy ESI GROUP jsou ideální pro použití se solvery od stejné firmy (CFD-ACE+, CFD-FASTRAN). Program CFD-GEOM je charakteristický tím, že má vlastní skriptovací jazyk Python, je velmi flexibilní a univerzální (kombinace s ostatními CFD/FEA/CAE programy). CFD-VISCART je ideální pro aplikace v letectví a automobilním inženýrství.

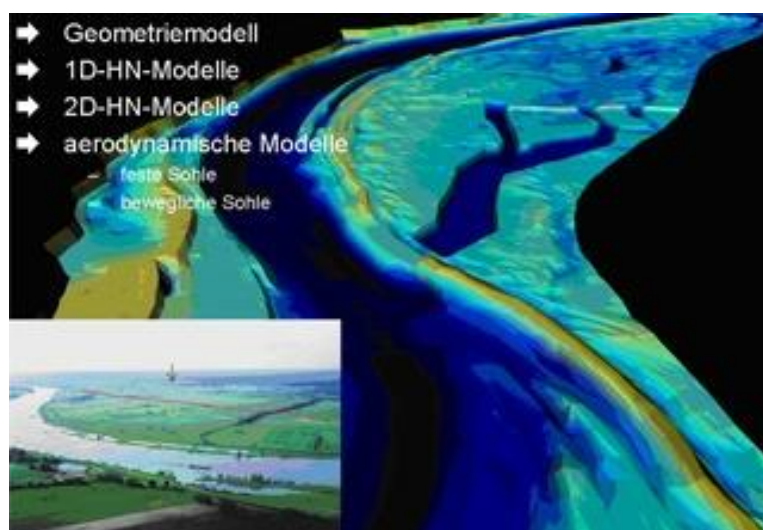
### 3.2.8 GridZ

Program firmy Zeus Numerix je preprocesor určený pro ty, kteří dávají přednost vlastním CFD kódům pro vytvoření vlastních modelů.

## 3.3 Vizualizace

### 3.3.1 COVISE cfd

Program COVISE od firmy VISENSO je vizualizační software podporující virtuální realitu. Jako nástroj vizualizace je COVISE používán např. v oblasti aerodynamiky, mikroelektroniky, elektromagnetismu, pro simulaci proudění v interiéru automobilu, simulaci procesu hoření v motorech, simulaci toku řek, simulaci rozptylování plynů a při návrhu klimatizací budov.



Obr. 32 COVISE cfd - simulace toku řeky [24]

### 3.3.2 Tecplot 360 2008

Tento program je určen pro numerickou simulaci a CFD vizualizaci. Vyznačuje se zejména jednoduchým vytvářením animací, podporou časově závislých řešení a rychlým zpracováváním. Rychlý procesing je možný díky tomu, že jsou zpracovávána pouze data, která jsou v danou chvíli užívána.

### 3.3.3 CFD-VIEW

Produkt firmy ESI GROUP určený pro vizualizaci, který má velmi intuitivní ovládání a doplňuje solvery od stejné firmy (CFD-ACE+, CFD-FASTRAN).

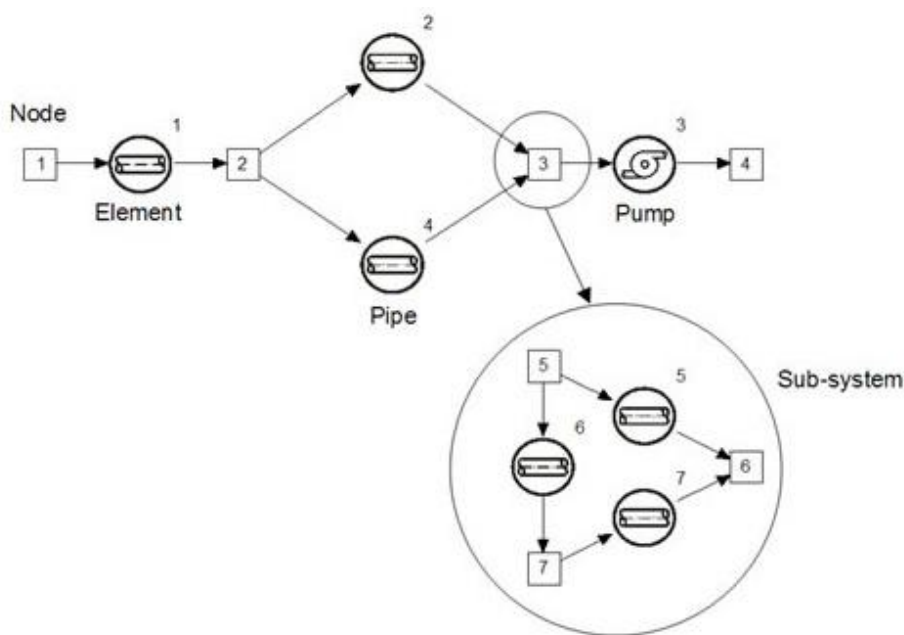
## 3.4 Systémy

### 3.4.1 Flownex

Flownex je systémový CFD program pomocí kterého může uživatel vytvářet a analyzovat velké množství systémů od jednoduchého systému trubek až po motor s plynovou turbínou.

Jednotlivé komponenty odlišné složitosti jsou spojeny dohromady do jedné sítě, která představuje komplexní systém. Systém je zdiskretizován, tedy je vytvořeno množství kontrolních objemů, na které jsou aplikovány rovnice a ty jsou posléze vyřešeny. Algoritmus řešení se tedy podobá klasickému CFD kódu. Program je využíván v mnoha odvětvích průmyslu, např. v jaderném průmyslu, chemickém průmyslu, automobilním a leteckém průmyslu, v kosmonautice, v hornictví, zemědělství, atd.

K zobrazení sítě systému používá program Flownex uzly a elementy. Elementy představují komponenty jako potrubí, čerpadla, kompresory a výměníky tepla, zatímco uzly jsou koncové body elementů. Flownex řeší v každém elementu pohybové rovnice a v každém uzlu zase rovnici kontinuity a energie. Do hlavní sítě systému mohou být vkládány tzv. subsítě, které jsou pak řešeny dohromady s hlavními jako jedna velká síť.



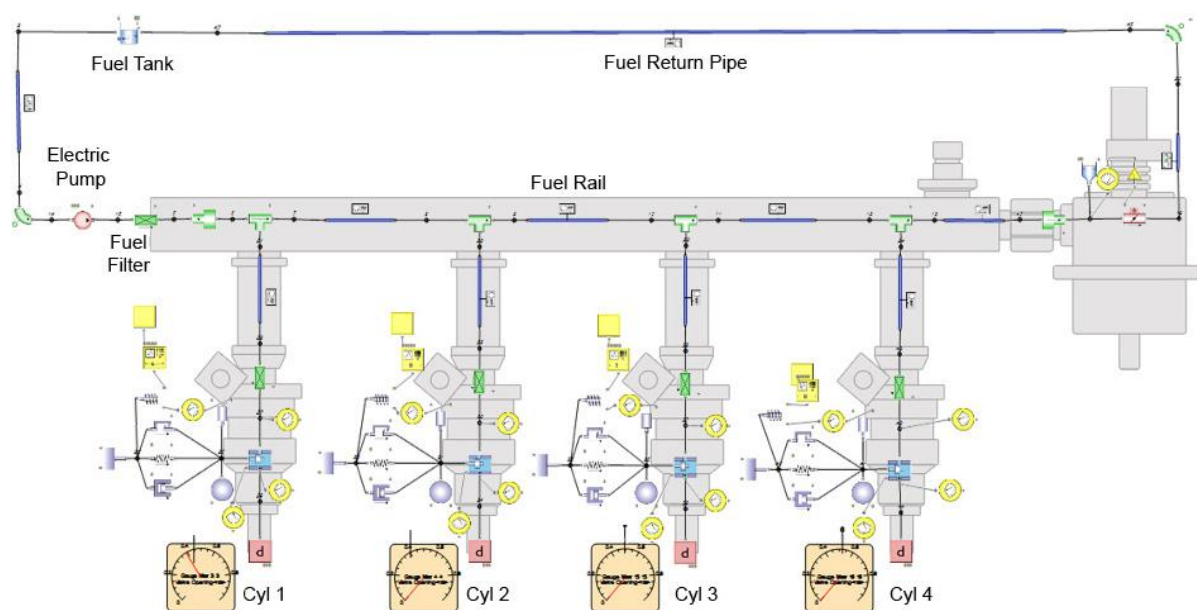
Obr. 33 Flownex - síť systému se subsystémem [22]

### 3.4.2 Flowmaster V7

Flowmaster je program umožňující virtuální vytváření systémů, pomocí kterých se provádí komplexní simulace. Na platformě tohoto programu jsou vytvořeny další tři programy zaměřující se na oblast:

- letectví (Flowmaster V7 Aerospace) - palivové systémy, hydraulické systémy, ECS systémy
- automobilního průmyslu (Flowmaster V7 Automotive) - chladicí systém, mazací systém, palivový systém, výfukový systém
- plynových turbín (Flowmaster V7 Gas Turbine) - sekundární vzduch, mísení kapalin

Jednotlivé programy disponují knihovnou standardních komponentů a také řadou stavebních komponentů.



Obr. 34 Flowmaster V7 Automotive - palivový systém [23]

## 4. Základní vlastnosti tekutin (plynů)

Tekutiny mají buď charakter kapalin, anebo plynů. Společný název tekutiny pro kapaliny a plyny vychází z jejich společné vlastnosti, tedy tekutosti. Ta je způsobena značnou pohyblivostí částic tekutin, kdy u plynů je vzájemná pohyblivost částic větší než u kapalin. Další vlastností tekutin je, že nemají vlastní tvar, pouze se přizpůsobují tvaru těles, v nichž se momentálně nacházejí. Tekutiny lze také rozdělit na stlačitelné a nestlačitelné, přesněji řečeno málo stlačitelné. Plyny jsou charakteristické snadnou stlačitelností, což je způsobeno velkými vzdálenostmi mezi molekulami plynu, tedy malými silami mezi molekulami.

Při práci s CFD softwarem nebo při samotné tvorbě programu je více než nutné znát základní vlastnosti tekutin a základní fyzikální veličiny tekutin, aby výsledný výpočet odpovídal realitě.

### 4.1 Základní fyzikální veličiny plynů

#### 4.1.1 Teplota

Teplota je základní fyzikální veličinou. Je to projev tepelného pohybu molekul látky a zároveň vyjadřuje míru střední energie tohoto pohybu.

Rozlišujeme teplotu:

a.) Celsiovu teplotu  $t$ , kterou vyjadřujeme ve stupních Celsia [ $^{\circ}\text{C}$ ], kdy Celsiův stupeň je definován jako 1/100 rozdílu teploty  $100^{\circ}\text{C}$  (teplota varu vody) a  $0^{\circ}\text{C}$  (teplota tuhnutí vody) při tlaku  $p = 0$ , 101325 MPa

b.) termodynamickou neboli absolutní teplotu  $T$  udávanou v kelvinech [K] kdy je kelvin definován jako 273,16-tá část termodynamické teploty 0,01°C (trojný bod vody)

$$T(K) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (22)$$

Jeden kelvin je roven jednomu stupni Celsia a číslo 273,15 je teplotní rozdíl mezi trojným bodem a absolutní nulou vody.

#### 4.1.2 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství tepla, kterým se jednotková hmota plynu ohřeje o jeden kelvin. Charakterizuje schopnost tělesa ukládat teplo, když se mění teplota.

U stlačitelných tekutin, tedy plynů, je nutné při sdílení tepla rozlišovat:

$c_p$  ... měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku  $[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$   
 $c_v$  ... měrnou tepelnou kapacitu za konstantního objemu  $[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

Rozlišení je potřebné, jelikož za těchto dvou okrajových podmínek je pro stejný rozdíl teplot třeba přivést nebo odvést různé teplo.

Hodnoty pro vzduch jsou:  $c_p = 1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
 $c_v = 718 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

#### 4.1.3 Tlak

Tlakem se rozumí silový účinek molekul vlivem tepelného pohybu částic na jednotku plochy, jednotkou tlaku je pascal [Pa].

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (23)$$

Lze napsat  $1\text{Pa} = 1\text{Nm}^{-2}$ , z čehož vyplývá, že jeden pascal je tlak, který vyvolá síla 1N rovnoměrně rozložená na ploše o obsahu  $1\text{m}^2$  a působící kolmo na tuto plochu.

Tlak vzduchu vyvolaný tíhovou silou (atmosférickou tlakovou silou) se nazývá atmosférický tlak  $p_a$ . Atmosférický tlak se mění s nadmořskou výškou a proměňuje se dokonce i na stejném místě v závislosti na povětrnostní situaci. Proto byl stanoven normální atmosférický tlak  $p_n$ .

$$p_n = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa}.$$

Dále rozlišujeme tlaky měřené při proudění tekutin:

- statický tlak  $p_s$  - tlak tekutiny za relativního klidu, v celém průtočném průřezu stejný, tlak působící na povrch dostatečně malého tělesa, které se pohybuje stejnou rychlostí jako proudící tekutina, u kapalin nazýván hydrostatický, u plynů aerostatický,
- kinetický tlak  $p_k$  - funkcí rychlosti proudění tekutiny a její hustoty

$$p_k = \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (24)$$

- dynamický tlak  $p_d$  - zahrnuje vliv stlačitelnosti kapaliny na hodnotu kinetického tlaku, v případě proudění plynu se jedná o aerodynamický tlak

$$p_d = \rho \cdot v^2 \quad (25)$$

- celkový tlak  $p_c$  - roven součtu statického a dynamického tlaku nebo statického a kinematického tlaku, celkový tlak je při stacionárním proudění podél proudnice konstantní (vzájemně se mění tlak statický a dynamický)

$$p_c = p_s + p_d = p_s + p_k \quad (26)$$

#### 4.1.4 Hustota

Hustota je definovaná jako podíl hmotnosti homogenní látky k jejímu objemu, jednotkou je kilogram na krychlový metr [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (27)$$

#### 4.1.5 Viskozita

Viskozita nebo také vazkost je fyzikální veličina, která charakterizuje vnitřní tření a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi. Viskozita plynů na rozdíl od kapalin s rostoucí teplotou stoupá.

a.) dynamická viskozita  $\eta$  [ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ; Pa.s] - udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění tekutiny

Tečné napětí  $\tau$  je plošné silové působení mezi dvěma sousedními vrstvami tekutiny s různou rychlostí, kdy pomalejší vrstva brzdí rychlejší a naopak.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (28)$$

$dv/dy$ ...	gradient rychlosti ve směru kolmém na rychlost	[-]
$\eta$ .....	dynamická viskozita	[ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\tau$ .....	tečné napětí	[MPa]

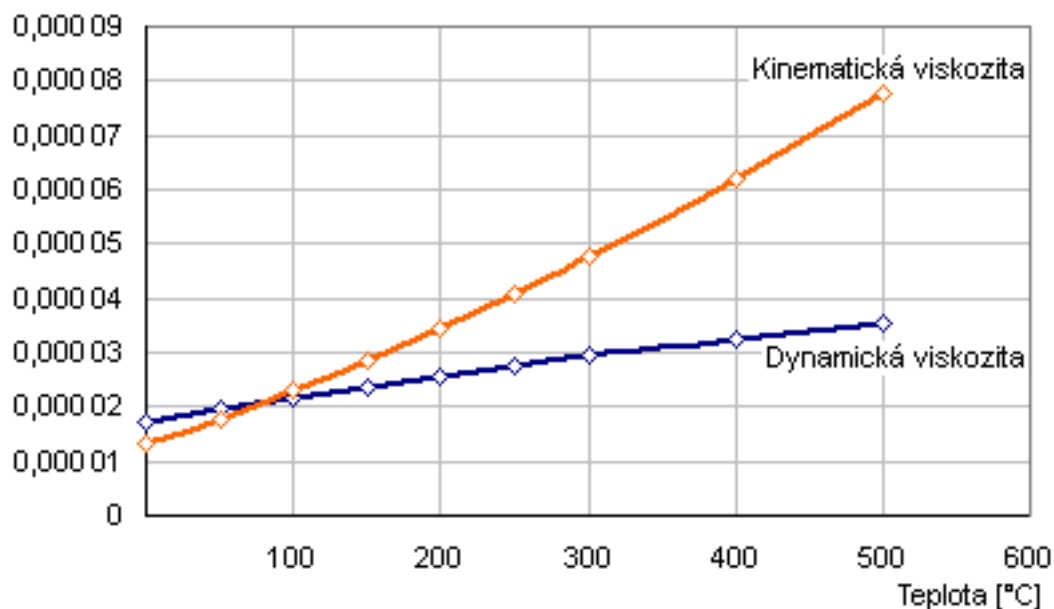
Převrácená hodnota viskozity  $\varphi$  se nazývá tekutost.

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (29)$$

b.) kinematická viskozita  $\nu$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; 1 stokes =  $1 \cdot 10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] - podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny, vyjadřuje poměr velikosti viskózních a setrvačných sil pro danou tekutinu, zavedena pro zjednodušení



$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (30)$$



Obr. 35 Závislost viskozity plynu na teplotě [37]

## 5. Proudění

Tekutiny mají velmi malou soudržnost, tudíž jsou jejich částice velmi pohyblivé. Tento pohyb tekutin nazýváme proudění. Částice tekutiny se pohybují po trajektoriích, které se nazývají proudnice.

Proudění můžeme dělit:

a.) podle závislosti proudění na čase

- stacionární (ustálené) - charakteristické veličiny proudu jsou nezávislé na čase, částice tekutiny mají v každém místě časově neproměnnou rychlost a směr
- nestacionární (neustálené) - charakteristické veličiny proudu se mění s časem

b.) podle uspořádání proudění v prostoru - umožňuje zanedbání či zjednodušení některých okrajových podmínek, vychází z matematického modelu určité praktické aplikace

- jednorozměrné - proudění po střední proudnici
- dvourozměrné (rovinné) - reálné proudění
- třírozměrné (prostorové) - nejvíce odpovídá skutečnosti, veličiny jsou určeny polohou v prostorovém souřadném systému

c.) proudění ideální kapaliny

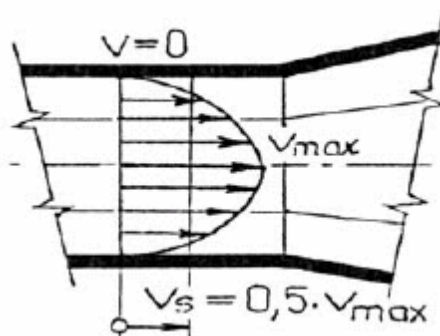
- nevířivé (potenciální) - částice tekutiny se pohybují přímočaře nebo křivočaře po proudnicích a vůči pozorovateli se neotáčejí kolem vlastní osy
- vířivé - částice tekutiny se vůči pozorovateli otáčejí kolem vlastní osy

d.) proudění reálné tekutiny

- laminární
- turbulentní

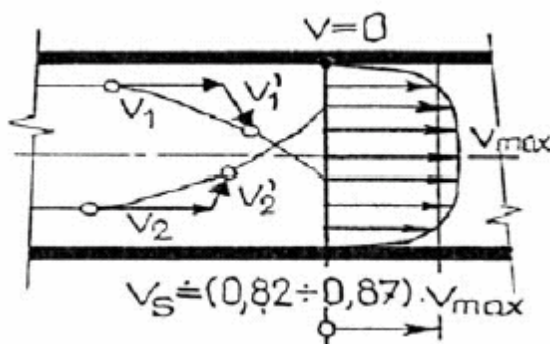
### 5.1 Laminární a turbulentní proudění

Laminární proudění je proudění, kdy se částice pohybují ve vrstvách a tyto vrstvy se vzájemně nepromíchávají. V případě jednorozměrného proudění v potrubí má rychlostní profil tvar rotačního paraboloidu (Obr. 36). Laminární proudění je vířivé, jelikož část tekutiny vyskytující se mezi dvěma vrstvami s rozdílnou rychlostí má tendenci se otáčet. Při malé rychlosti tekutiny nedochází k výraznému rozvinutí vírů, ovšem při zvyšování rychlosti proudění začnou víry proudění ovlivňovat a laminární proudění se změně na turbulentní proudění.



Obr. 36 Laminární proudění [8]

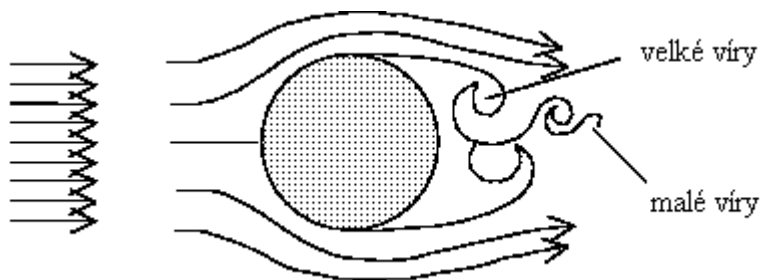
Turbulentní proudění je proudění, při kterém částice konají nejen posuvný pohyb, ale i složitý vlastní pohyb. Částice tedy mají kromě posuvné složky rychlosti  $v$  ještě turbulentní (flukтуаční) složku rychlosti  $v'$ . Pomocí flukтуаční složky rychlosti se částice pohybují po průřezu. Turbulentní proudění je nestacionární, jelikož flukтуаční rychlost mění s časem svou velikost i směr. Rychlostní profil turbulentního proudění se tvarem blíží profilu u ideální tekutiny, tedy rychlost je v celém profilu téměř stálá, až na tenkou vrstvu u stěny, kde dochází k prudké změně úměrně se vzdáleností od stěny (Obr. 37). Tato velmi tenká vrstva se nazývá mezní vrstva.



Obr. 37 Turbulentní proudění [8]

Základní situace pro vznik turbulentního proudění jsou: úplav za tělesem (Obr. 38), mezní vrstva, vytékání tekutiny a mísení proudů.





Obr. 38 Vznik turbulentního proudění  
při obtékání tělesa [3]

Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je dán Reynoldsovým číslem.

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad (31)$$

$v_s$  ... střední hodnota proudění tekutiny v daném průřezu [m.s<sup>-1</sup>]  
 $d$  ... průměr trubice [mm]  
 $\nu$  ... kinematická viskozita [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]

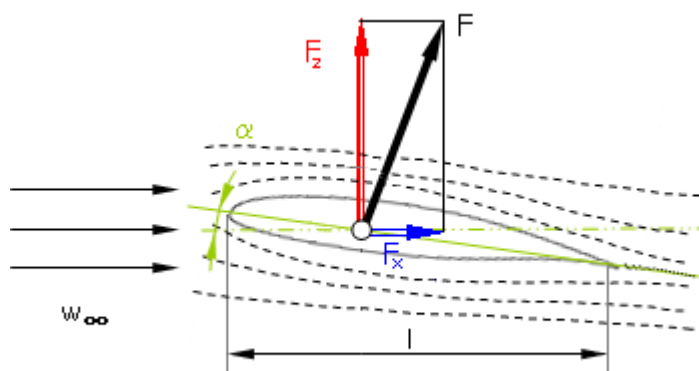
Kritická hodnota Reynoldsova čísla je pro různé tekutiny odlišná. Pro větší hodnoty než je kritická hodnota Reynoldsova čísla je proudění turbulentní a pro menší hodnoty je proudění laminární.

## 5.2 Mezní vrstva

Reynoldsovo číslo má význam také při studiu obtékání těles, kdy ovlivňuje charakter mezní vrstvy. Obtékané těleso má na svém povrchu nulovou rychlost proudění a dále se rychlost mění v závislosti na normálové vzdálenosti od povrchu. Pokud by těleso obtékala ideální tekutina, odpor by byl nulový. Když ale těleso obtéká skutečná tekutina, mezi tekutinou a tělesem vznikají silové účinky, které jsou vyvolány vlivem viskozity tekutiny (Obr. 39). Tyto silové účinky lze rozdělit na:

- vztlak (vztlaková síla  $F_z$ ) - působí kolmo na rychlost nenarušeného proudu (natéká na těleso pod úhlem  $\alpha$ )
- odpor (odporová síla  $F_x$ ) - působí ve směru pohybu, kolmo na vztlak, skládá se ze tří složek: třecí odpor, tlakový odpor, indukovaný odpor

Vliv viskozity tekutiny se projevuje v těsné blízkosti povrchu profilu, což je oblast nazývaná mezní vrstva. Mezní vrstva je velmi tenká vrstva kolem obtékaného tělesa, v níž se projevují efekty viskozity, vyvíjí se ve směru proudění, kdy roste její tloušťka a neuspořádanost. Mezní vrstva je buď laminární, nebo turbulentní, kdy laminární vrstva je mnohem tenčí.



Obr. 39 Obtékání křídlového profilu [13]

V laminární mezní vrstvě vrstvy tekutiny kloužou uspořádaně po sobě a mezi jednotlivými vrstvami probíhá jen malá výměna hmoty a energie. U turbulentní vrstvy je typický náhodný pohyb a probíhá zde výměna hmoty a energie mezi jednotlivými vrstvami tekutiny.

Vlastnosti mezní vrstvy jako přechod vrstvy mezi laminární a turbulentní, její tloušťka nebo její odtržení ovlivňuje mnoho faktorů. Jedná se o tlakový gradient, Reynoldsovo číslo, drsnost povrchu, viskozita tekutiny, atd. Nejvýznamnějším je tlakový gradient podél směru proudu  $\frac{\partial p}{\partial x}$ . Pokud je tlakový gradient větší než nula, tlak roste po proudu a jedná se o nepříznivý tlakový gradient (mezní vrstva dříve přechází do turbulentní, větší sklon k odtržení). Naopak pokud je tlakový gradient menší než nula, tlak klesá po proudu a jedná se o příznivý tlakový gradient (stabilizace mezní vrstvy, je tenčí, delší laminární část).

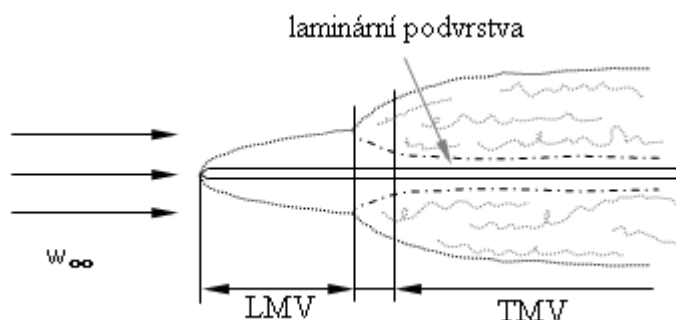
Dále mezní vrstvu charakterizuje již zmiňované Reynoldsovo číslo.

$$Re = \frac{w_{\infty} \cdot l}{\nu} \quad (32)$$

$w_{\infty}$ .... rychlost nenarušeného proudu	[m.s <sup>-1</sup> ]
$l$ ..... délka obtékaného tělesa	[mm]
$\nu$ ..... kinematická viskozita	[cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]

$Re < 2 \cdot 10^5$  ..... laminární mezní vrstva, odtrhává se a vzniká úplav (= odtržení mezní vrstvy)  
 $Re \geq 2 \cdot 10^5$  ..... laminární mezní vrstva se mění na turbulentní, malý úplav → malá hodnota součinitele odporu  $c_x$

Nejjednodušší příklad mezní vrstvy při obtékání tělesa vzduchem bez vlivu tvaru tělesa na mezní vrstvu je znázorněn na Obr. 40.



Obr. 40 Obtékání rovné desky [13]

### 5.3 Rozdělení proudění plynů podle Machova čísla

Machovo číslo je bezrozměrný parametr, podle kterého určujeme charakter proudění, který se mění při rychlosti proudění blízké rychlosti zvuku.

$$M = \frac{v}{c} \quad (33)$$

v ... rychlost proudění tekutiny [m.s<sup>-1</sup>]  
c ... rychlost zvuku [m.s<sup>-1</sup>]

Rychlost zvuku je určitá konečná rychlost, kterou se šíří rozruchy ve stlačitelném prostředí.

$$a = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} \quad (34)$$

K ... Poissonova konstanta [-]  
r ..... měrná plynová konstanta [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]  
T .... teplota [K]

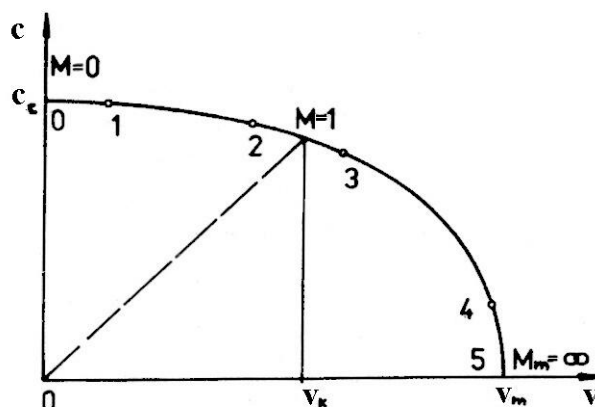
Pro rozdělení proudění jsou důležité tři stavy proudu:

- celkový - nulová rychlost,  $v = 0$  a  $M = 0$
- kritický - rychlost zvuku a rychlost proudu se rovná kritické rychlosti,  $c = v = v_k$  a  $M_k = 1$
- mezní - rychlost proudu dosáhla své maximální (mezní) hodnoty  $v = v_m$ ,  $c = 0$ ,  $M_m = \infty$

Graf závislosti rychlosti zvuku na rychlosti proudu, který charakterizuje Machovo číslo lze rozdělit na pět oblastí (Obr. 41):

- 0 - 1 ... Machovo číslo v této oblasti je mnohem menší než jedna ( $M \ll 1$ ), rychlost zvuku se zde mění jen velmi málo, horní mez  $M = 0,3$
- 1 - 2 ... oblast subsonického (podzvukového) proudění,  $M < 1$ , u 2D a 3D proudění končí oblast pokud se v kterémkoli místě dosáhne místního Machova čísla  $M = 1$ , dolní kritická mez  $M_{kd} = 0,8 - 0,9$  (závisí na tvaru kanálu)
- 2 - 3 ... oblast transsonického proudění pohybující se velmi blízko rychlosti zvuku,  $M \approx 1$ , proudění mezi dolním a horním kritickým Machovým číslem,  $M_{kh} = 1,2$

- 3 - 4 ...oblast supersonického (nadzvukového) proudění,  $M > 1$ , u 2D a 3D proudění začíná u  $M_{kh}$  a končí při  $M = 6 - 8$
- 4 - 5 ...oblast hypersonického proudění, Machovo číslo je mnohem větší než jedna ( $M \gg 1$ ), při malých změnách rychlosti proudu zde dochází k velkým změnám rychlosti zvuku, při obtékání těles ve velkých výškách atmosféry



Obr. 41 Závislost rychlosti zvuku na rychlosti proudu [7]

## 5.4 Nadzvukové proudění

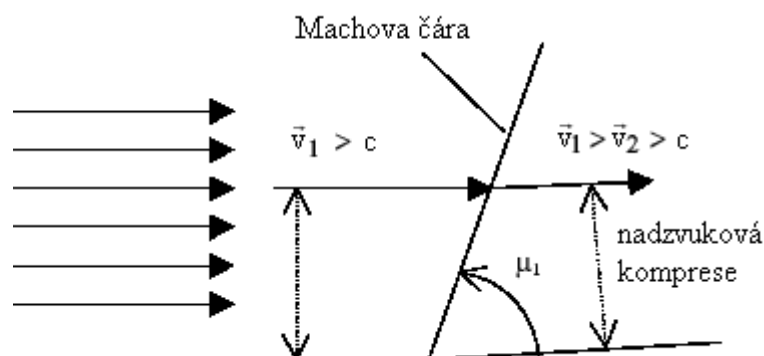
Pro stlačitelné proudění platí, že pokud se průřez trubice, kterou proudí tekutina, při nadzvukovém proudění zvětšuje, zvětšuje se i rychlost proudění. V případě podzvukového proudění je tomu přesně naopak, rychlost proudění se zmenšuje. Při proudění v místě minimálního průřezu je pak jeho rychlost rovna rychlosti zvuku ( $M = 1$ ).

Nadzvukové proudění má tu vlastnost, že se jím rozruchy šíří pouze ve směru proudění na rozdíl od podzvukového proudění, kde se rozruchy mohou šířit i proti směru proudu. Rozruchem se v případě proudění rozumí např. těleso vložené do proudu tekutiny nebo třeba zalomení obtékané stěny. V případě podzvukového proudění se proudění začíná přizpůsobovat a měnit svůj směr již před tělesem, a to díky tomu, že se proti směru proudu přenáší informace o rozruchu (tělese).

Nadzvukové proudění při obtékání např. velmi málo zalomené stěny má oblast rozrušeného proudu ohraničenu tzv. Machovou čarou (Obr. 42). Tato čára charakterizující oblast odkloněného proudu je odkloněna od směru proudu o úhel  $\mu_1$ , který je závislý na Machově čísle.

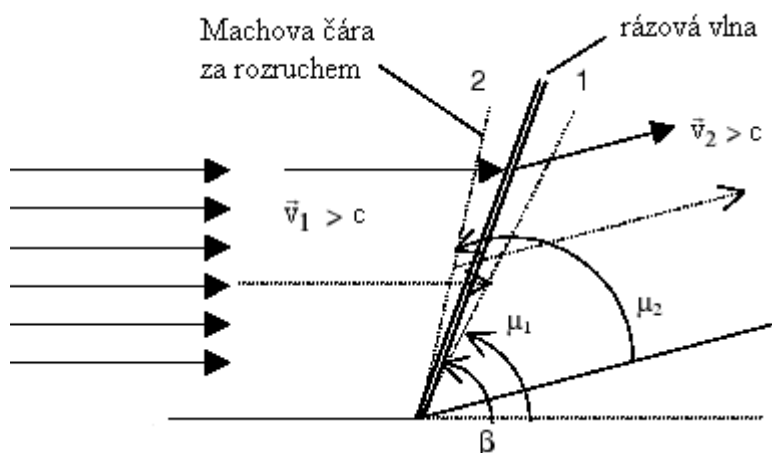
$$\mu_1 = \arcsin \frac{c}{v_1} = \arcsin \frac{1}{M_1} \quad (35)$$

Dochází k zbrzdění nadzvukového proudu vlivem přechodu částic tekutiny přes Machovu čáru, kdy se tyto částice dostávají blíže ke stěně a zmenšují tak vzdálenosti mezi proudnicemi.



Obr. 42 Rozrušení nadzvukového proudu [3]

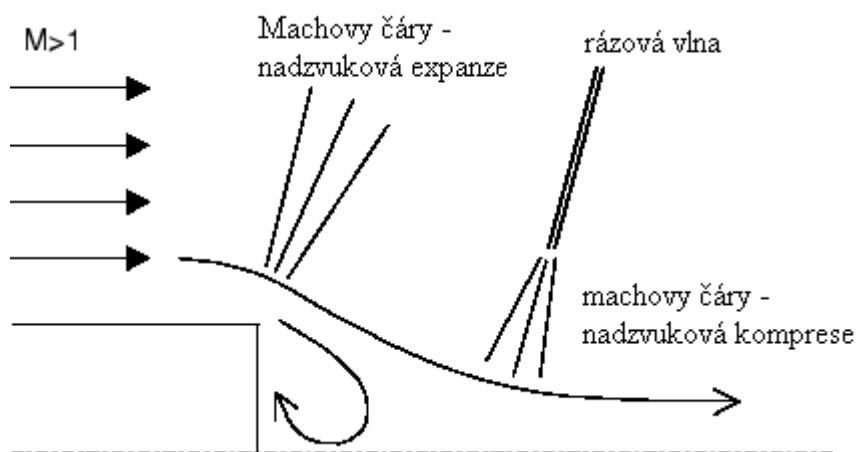
Dále platí, že pokud bude zakřivení stěny větší, bude větší i stlačení. Skoková změna tlaku se nazývá ráz, který se šíří prostředím jako rázová vlna. Mezi Machovými čarami 1 (před zakřivením) a 2 (po zakřivení) vzniká rovinná rázová vlna (Obr. 43). Vzniká proto, aby oblast rozrušeného proudu ohraničená Machovou čarou 2 nepředběhla oblast nerozrušeného proudění ohraničenou Machovou čarou 1. Polohu rázové vlny určuje úhel  $\beta$ .



Obr. 43 Vznik rázové vlny [3]

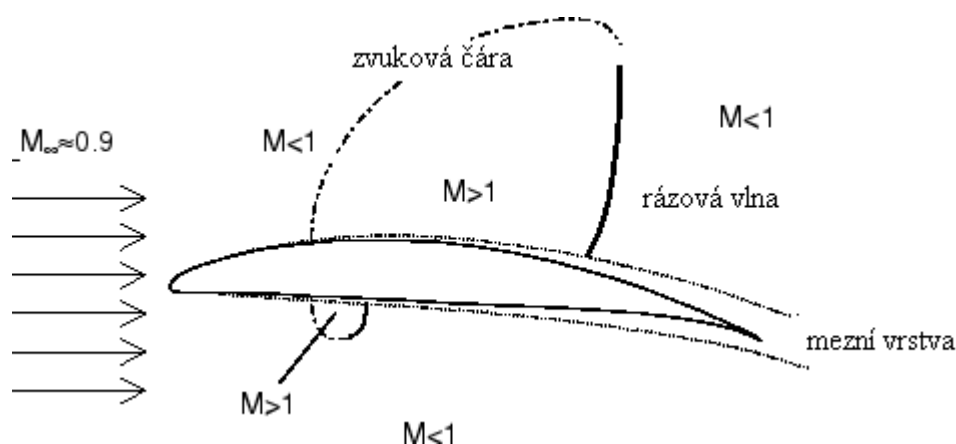
Při průchodu rázovou vlnou dochází k termodynamickým změnám, klesá celkový tlak, narůstá entropie, mění se hustota. Pokud se úhel  $\beta = 90^\circ$ , jedná se o příčnou rázovou vlnu, za kterou je vždy proudění podzvukové.

Při expanzi nadzvukového proudění je oblast rozrušení proudění opět vymezena Machovou čarou a v případě větší expanze dojde k vytvoření několika Machových čar, neboli svazku (Obr. 44).



Obr. 44 Nadzvukové obtékání tupé hrany [3]

Lokálně se může nadzvukové proudění objevit při obtékání podzvukovým prouděním, kdy jsou tyto lokální nadzvukové oblasti zakončeny příčnou rázovou vlnou (Obr. 45). V konečném výsledku dochází ke zvýšení odporu a zhoršení vzlaku.



Obr. 45 Obtékání křídlového profilu podzvukovým prouděním [3]

## 6. Proudění ve spalovacích motorech

Reálné proudění je nestacionární a prostorové. Jelikož i zdánlivě stacionární proudění vždy obsahuje víry unášené proudem, jsou základní parametry proudu závislé na čase.

Základní parametry proudu:

- tlak  $p = f(x, y, z, t)$
- teplota  $T = f(x, y, z, t)$
- hustota  $\rho = f(x, y, z, t)$
- rychlost  $v = f(x, y, z, t)$

V případě proudění ve spalovacích motorech je zavedena souřadná soustava nepohyblivá vůči povrchu či kanálu a proudění může být zjednodušeno na stacionární. Toto zjednodušení skutečného proudění na stacionární se nazývá kvazistacionární a je možné jej použít, jelikož lze v určitém časovém úseku předpokládat malé změny veličin proudu.

Při proudění ve spalovacích motorech je pro zjednodušení uvažován idealizovaný reálný plyn (ideální plyn), který je dokonale stlačitelný a bez vnitřního tření. Základními fyzikálními veličinami ideálního plynu jsou:

- měrná tepelná kapacita při stálém tlaku  $c_p$
- měrná tepelná kapacita při stálém objemu  $c_v$
- měrná plynová konstanta

$$r = c_p - c_v \quad (36)$$

- Poissonova konstanta

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (37)$$

Pro ideální plyn platí  $c_p, c_v = \text{konst.}$  a nemění se s teplotou. Platí zde stavová rovnice:

$$p = \rho r T \quad (38)$$

## 6.1 Základní vztahy pro popis proudění

Mechanika tekutin se řídí čtyřmi zákony:

- zákonem zachování hmoty - vyjádřen rovnicí kontinuity
- zákon o rovnováze sil - vyjádřen Navier-Stokesovou rovnicí pro laminární proudění skutečné tekutiny
  - vyjádřen Reynoldsovou rovnicí pro turbulentní proudění
  - vyjádřen Eulerovou rovnicí pro proudění ideální tekutiny
- zákon o zachování energie - vyjádřen Bernoulliho rovnicí
- zákon o změně hybnosti - tzv. impulsová věta

Základní vztahy dynamiky proudící tekutiny jsou rovnice kontinuity a pohybové rovnice (EulEROVY rovnice). Z pohybových rovnic je pak odvozena Bernoulliho rovnice.

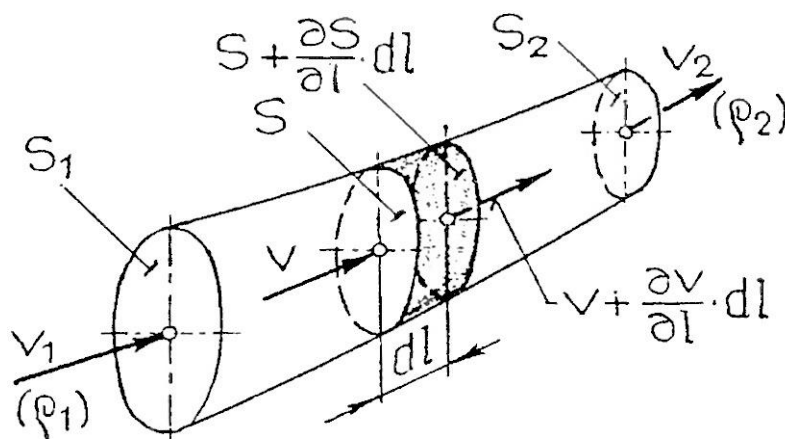
### 6.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování hmotnosti. Její obecné odvození je provedeno pro jednorozměrné nestacionární proudění stlačitelného média protékající trubicí proměnného průřezu. Výsledkem odvození je pak obecná rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial}{\partial l} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) + \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \cdot S) = 0 \quad (39)$$

V této rovnici jsou základní veličiny ( $\rho, S, v$ ) obecně dány podmínkami:

$$\rho = \rho(l; t), S = S(l; t), v = v(l; t)$$



Obr. 46 Trubice pro odvození rovnice kontinuity [8]

Pokud obecné podmínky omezíme, dostaneme zjednodušené rovnice kontinuity:

- rovnici pro tuhé potrubí - průřez nezávisí na čase,  $S = S(l)$

$$\frac{\partial}{\partial l} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) + S \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (40)$$

- rovnici pro ustálené proudění - neplatí závislost veličin na čase

$$\frac{\partial}{\partial l} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) = \frac{\partial}{\partial l} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) = 0 \rightarrow \rho \cdot S \cdot v = konst \quad (41)$$

Konstantou na pravé straně rovnice se rozumí hmotnostní průtok  $\dot{m}$  [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v = konst \quad (42)$$

Pro stacionární proudění platí, že každým průřezem trubice protéká stejný hmotnostní průtok.

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 = \rho \cdot S \cdot v = konst \quad (43)$$

### 6.1.2 Eulerovy rovnice

Pohybové rovnice pro proudění reálné tekutiny se nazývají Navier-Stokesovy rovnice, pro proudění ideální tekutiny jsou to Eulerovy rovnice.

Eulerova rovnice vyjadřuje rovnováhu sil v tekutině, kdy za předpokladu ideální tekutiny je třecí síla nulová. Pro jednorozměrné proudění platí:

$$\vec{F}_m + \vec{F}_p = \vec{F}_s \quad (44)$$

$F_m$  ... hmotnostní síla na jednotku hmotnosti [N]

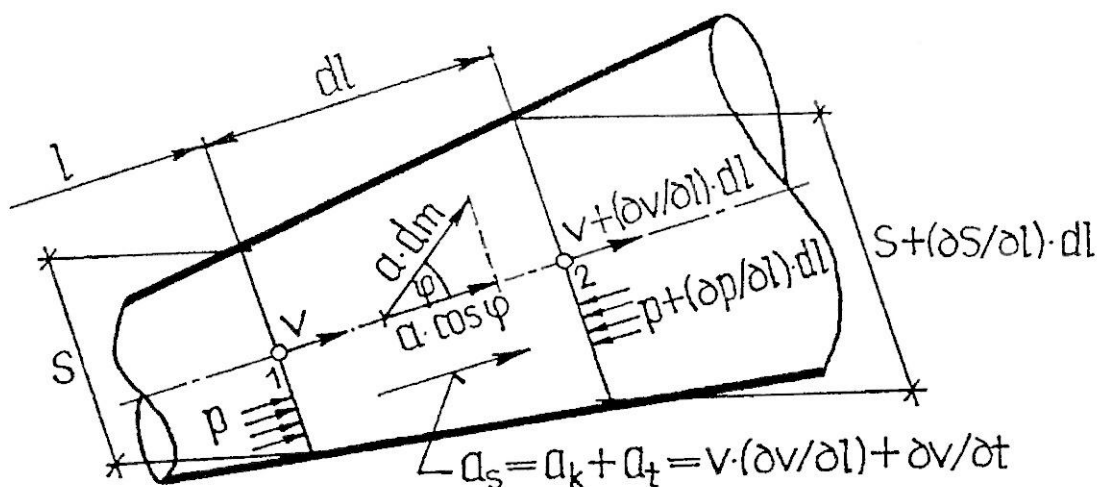
$F_p$  .... tlaková síla na jednotku hmotnosti [N]

$F_s$  .... setrvačná síla na jednotku hmotnosti [N]



Jednotka hmotnosti:

$$dm = \rho \cdot dV \quad (45)$$



Obr. 47 Silová rovnováha v trubici na element dl [8]

Výsledná rovnováha sil na jednotku hmotnosti, což je také tvar Eulerovy rovnice pro jednorozměrné proudění ideální tekutiny, má tvar:

$$a \cdot \cos \varphi - \frac{\partial p}{\rho \cdot \partial l} = v \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (46)$$

Pokud  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \rightarrow$  jedná se o stacionární proudění a je-li  $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \rightarrow$  jde o nestacionární proudění.

Pro obecné prostorové proudění, např. pro osu x platí:

$$dF_{mx} + dF_{px} = dF_{sx} \quad (47)$$

Vektorový tvar Eulerovy rovnice pro obecné prostorové proudění ideální tekutiny má tvar:

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p = \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (48)$$

Složkový tvar Eulerovy rovnice pro obecné prostorové proudění, např. pro osu x má tvar:

$$a_x - \frac{\partial p}{\rho \cdot \partial x} = \frac{dv_x}{dt} \quad (49)$$

Rozepsaný složkový tvar Eulerovy rovnice pro obecné prostorové proudění, např. pro osu x má tvar:

$$a_x - \frac{\partial p}{\rho \cdot \partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} \cdot v_z + \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad (50)$$

### 6.1.3 Bernoulliho rovnice

Obecná Bernoulliho rovnice vychází z vektorového tvaru Eulerovy rovnice pro obecné prostorové proudění ideální kapaliny, která vyjadřuje silovou rovnováhu ideální kapaliny při proudění. Po odvození má Bernoulliho rovnice pro proudění ideální kapaliny pro libovolný průřez proudové trubice tvar:

$$\frac{v^2}{2} + \int_1^2 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \cdot d\vec{l} + P - U = konst \quad (51)$$

$P = \left(\frac{p}{\rho}\right) + konst \dots$  tlaková funkce

$U = -g \cdot z + konst \dots$  potenciál (působí-li na tekutinu tíhové zrychlení)

Po dosazení  $P$  a  $U$  do rovnice (51) dostaneme Bernoulliho rovnici ve tvaru:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = konst \quad (52)$$

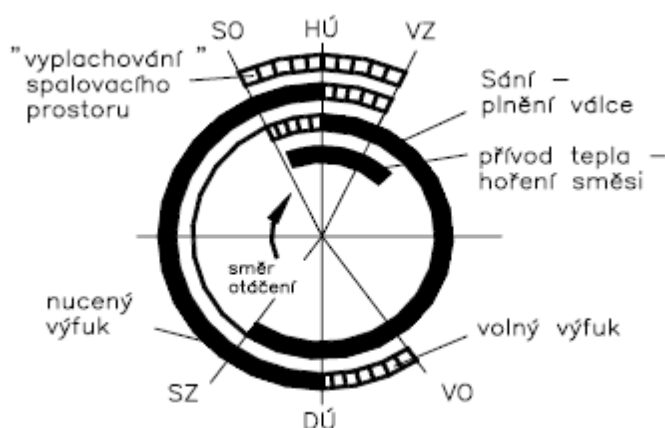
Pokud známe parametry potrubí a poměry ve výchozím bodě 1, lze rovnici využít např. pro určení tlakových poměrů v koncovém bodě 2. Tedy pro dva průřezy proudové trubice má Bernoulliho rovnice tvar:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 \quad (53)$$

## 7. Plnění válce

Na plnění válců je závislý výkon motoru. Samotné plnění válce závisí především na tvaru a délce sacího potrubí a také na geometrických vlastnostech sacího ventilu.

Naplnění válce čerstvou směsí probíhá při pohybu pístu z horní do dolní úvratě, tedy během zdvihu pístu, který je u nepřepřehňovaného spalovacího motoru rozdělen na pět fází.



Obr. 48 Časování čtyřdobého motoru [39]

První fáze začíná okamžikem otevření ventilu a končí tehdy, když je píst v horní úvratí. Tato fáze zajišťuje, aby byl sací ventil dostatečně otevřen ve chvíli počátku sacího zdvihu pístu. Mimo jiné slouží také k vypláchnutí spalovacího prostoru od zbylých spalín.

Druhá fáze začíná v horní úvratí a končí při pootočení klikové hřídele o 80° za horní úvrat', kdy má píst maximální rychlost. Během této fáze nejdříve dochází ke škrcení média, jelikož je ventil nedostatečně otevřen. Následkem neustálého zvyšování objemu ve válci začínají expandovat zbytkové spaliny z minulého cyklu, což zapříčiňuje snížení tlaku ve válci. Otevření sacího ventilu se zvyšuje a tím i intenzita proudění náplně do válce. Částice čerstvé náplně jsou urychlovány do válce motoru díky přetlakovým rozruchům vzniklých šířením podtlakových rozruchů do vyústění sacího kanálu.

Třetí fáze končí v okamžiku, kdy je píst v dolní úvratí. Během této fáze postupně narůstá tlak ve válci a rychlost pístu se snižuje z maximální hodnoty až na nulovou. Se snižující se rychlostí pístu, kdy dochází k uzavírání sacího ventilu, se snižuje i intenzita plnění válce čerstvou směsí.

Při čtvrté fázi dochází k dodatečnému plnění válce vlivem setrvačnosti proudící směsi. Toto plnění má větší hodnotu tlaku než je hodnota tlaku ve válci, který se zvyšuje díky zmenšujícímu se objemu spalovacího prostoru.

Během páté fáze pracovní náplň vtéká zpátky do sacího potrubí, a to v důsledku vyšší hodnoty tlaku ve válci oproti tlaku způsobeného setrvačností směsi a přetlakovými vlnami. Aby se předešlo tomuto nežádoucímu efektu, je vhodné sací ventil uzavírat v rozmezí pootočení klikového hřídele o úhel 30-60° z dolní úvratí. Průběh páté fáze je odlišný v závislosti na otáčkách motoru. Při nízkých otáčkách nastává pouze zpětný výtok náplně do sacího potrubí. Při středně vysokých otáčkách dochází k dodatečnému plnění, které těsně před uzavřením ventilu přechází ve zpětný výtok náplně do sacího potrubí. Při vysokých otáčkách probíhá většinou jen dodatečné plnění.

## 7.1 Plnicí účinnost

Plnicí účinnost popisuje účinnost naplnění válce, je jakýmsi měřítkem kvality výměny média a je vyjádřena vztahem:

$$\eta_p = \frac{M_c}{M_t} = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_c}{V_Z \cdot i_v \cdot \rho_1 \cdot \frac{n}{60 \cdot k}} \quad (54)$$

$M_c$ ....	hmotnost celkové čerstvé náplně motoru	[kg]
$M_t$ ....	hmotnost teoreticky dopravitelné náplně motoru	[kg]
$\dot{m}_c$ ....	hmotnostní průtok čerstvé náplně motoru	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}_t$ ....	hmotnostní průtok teoreticky dopravitelné náplně motoru	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$V_Z$ ....	zdvihový objem jednoho válce	[m <sup>3</sup> ]
$i_v$ .....	počet válců	[-]
$\rho_1$ .....	hustota vzduchu před sacím kanálem	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$n$ .....	otáčky motoru	[min <sup>-1</sup> ]
$k$ .....	otáčkový součinitel ( pro čtyřdobý motor $k = 2$ , pro dvoudobý motor $k = 1$ )	[-]

Hodnota plnicí účinnosti je závislá zejména na ztrátách vzniklých v rozvodovém mechanismu a plnicím traktu, na množství zbytkových spalín ve válci a na velikosti přestupu tepla ze stěn válce do plnicího média.

Stupeň naplnění je možné vyjádřit také objemovou účinností:

$$\eta_v = \frac{V_s}{V_z} = \frac{\frac{M_v}{\rho_1}}{V_z} = \frac{M_v}{\rho_1 \cdot V_z} \quad (55)$$

$V_s$ ... skutečný spotřebovaný objem vzduchu na válec	$[\text{m}^3]$
$V_z$ ... zdvihový objem jednoho válce	$[\text{m}^3]$
$M_v$ ... hmotnost čerstvé náplně jednoho válce	$[\text{kg}]$
$\rho_1$ ... hustota vzduchu před sacím kanálem	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

## 7.2 Sací kanály

U sacích kanálů je důležitý jejich tvar, průřez, délka, povrch a poloha vzhledem k ose válce, jelikož tyto parametry mají podstatný vliv na odpor proudění vzduchu. Tvar kanálu je významným činitelem ve vztahu k výkonu motoru.

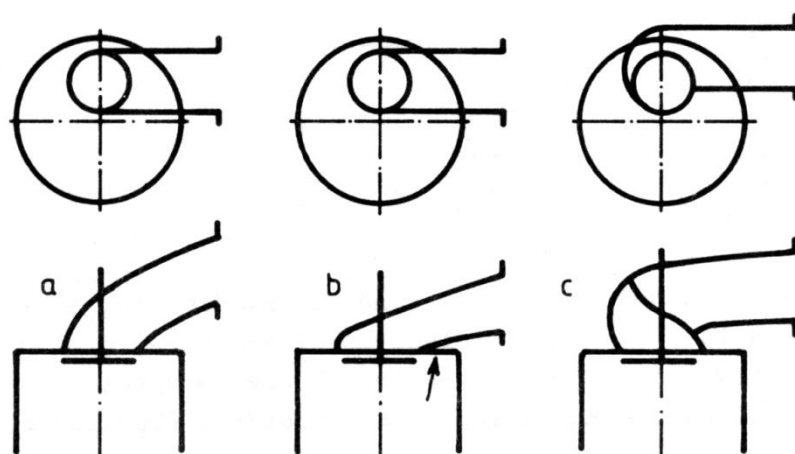
Jedním z důležitých parametrů je průřez sacího kanálu. Vzhledem k prostorové dispozici má sací kanál ideální průřez jen v několika místech a proto je zaveden tzv. hydraulický průměr. Hydraulický průměr vznikne, když se skutečná plocha průřezu vytvoří jako kruhová. Průměr sacího kanálu je pak společně s průměrem sacího ventilu a průměrem vrtání válce faktorem ovlivňujícím hmotnost přiváděného vzduchu do válce.

Při návrhu vhodného sacího kanálu je základním kritériem, aby kanál kladl co nejmenší odpor při průtoku plynů. Tomuto požadavku nejlépe vyhovují kanály přímé, což jsou kanály s co největším poloměrem zakřivení vstupující do válce rovnoběžně s osou dřívku ventilu.

U závodních motorů jsou někdy používány kanály spádové, které se vyznačují co nejmenší odchylkou střednice kanálu od osy válce.

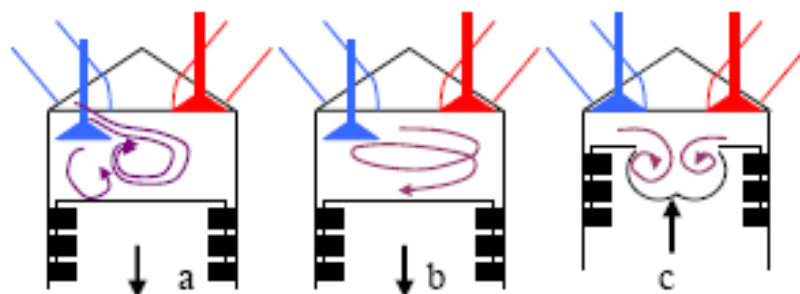
Dalším požadavkem, který lze při návrhu sacího kanálu ovlivnit, je optimální průběh hoření směsi ve válci. Pro optimální hoření je nutná rotace směsi ve válci, které lze dosáhnout pomocí tangenciálního sacího kanálu. U čtyřventilových hlav se pak užívá kombinace přímého a tangenciálního sacího kanálu, kdy přímý kanál umožňuje optimální naplnění při vysokých otáčkách, a tangenciální optimální rozvíření při nízkých otáčkách.

U vznětových motorů s přímým vstřikem se užívá sací kanál šroubový, který vytváří intenzivní radiální vír potřebný pro dokonalé smísení paliva se vzduchem a následné spálení vstřikovaného paliva. Při použití šroubového sacího kanálu narůstá odpor sání, je vyžadován větší prostor, ale výhodou je, že není tak citlivý na výrobní tolerance.



Obr. 49 Sací kanály: a.) přímý, b.) tangenciální, c.) šroubový [15]

Rozvíření náplně napomáhá tvorbě směsi ve válci a má různý charakter. Příčný vír je vyvolaný vhodným nasměrováním sacího ventilu a jeho osa je kolmá k podélné ose válce. Vzniká přirozeně u čtyřventilové hlavy se střechovitým prostorem nebo dvouventilové hlavy s kulovým prostorem a vedením sacího kanálu od výfukové strany jej lze obrátit. Vír tečný neboli tangenciální je vyvolaný vhodnou konstrukcí sacího kanálu a osa tohoto víru je v podélném směru válce. Tento vír vytváří kanál tangenciální a šroubový (nebo kombinace), problém s vytvořením víru nastávají v případě použití více ventilů. Radiální víření při kompresním zdvihu je vyvoláno tvarem spalovacího prostoru ve dně pístu. Je obvyklý pro vznětové motory s přímým vstřikem, ale význam má i u zážehových motorů.



Obr. 50 Vír: a.) příčný - tumble, b.) tečný (tangenciální) - swirl, c.) radiální - squash [40]

### 7.3 Geometrické vlastnosti ventilů

Sací ventily výrazně ovlivňují účinnost naplnění válce médiem. Při navrhování vhodného sacího kanálu je důležité věnovat pozornost také geometrickým vlastnostem ventilu, tak aby v otevřeném stavu kladl ventil co nejmenší odpor proudícímu médiu.



Obr. 51 Ventil spalovacího motoru [11]

a.) zdvih ventilu

- nízký zdvih - vzduch (směs) proudí mezi sedlem ventilu a dosedací plochou sedla ventilu v hlavě válců
- střední zdvih - tok se oddělí od vnitřního okraje sedla ventilu a směřuje k vnější hraně dosedací plochy ventilu
- vysoký zdvih - tok je oddělen od vnitřního okraje sedla ventilu a je zachována forma volně proudícího paprsku

b.) úhel sedla ventilu  $\beta$

- u výfukových ventilů vždy  $\beta = 45^\circ$
- málo zatížené vznětové motory  $\beta = 30^\circ$  (větší průtočný průřez v sedle ventilu, nižší tuhost talířku)
- od sedla talířku ventilu se liší o 0,5 až 1° (lepší záběh ventilu do sedla → lepší těsnění)

c.) šířka sedla ventilu

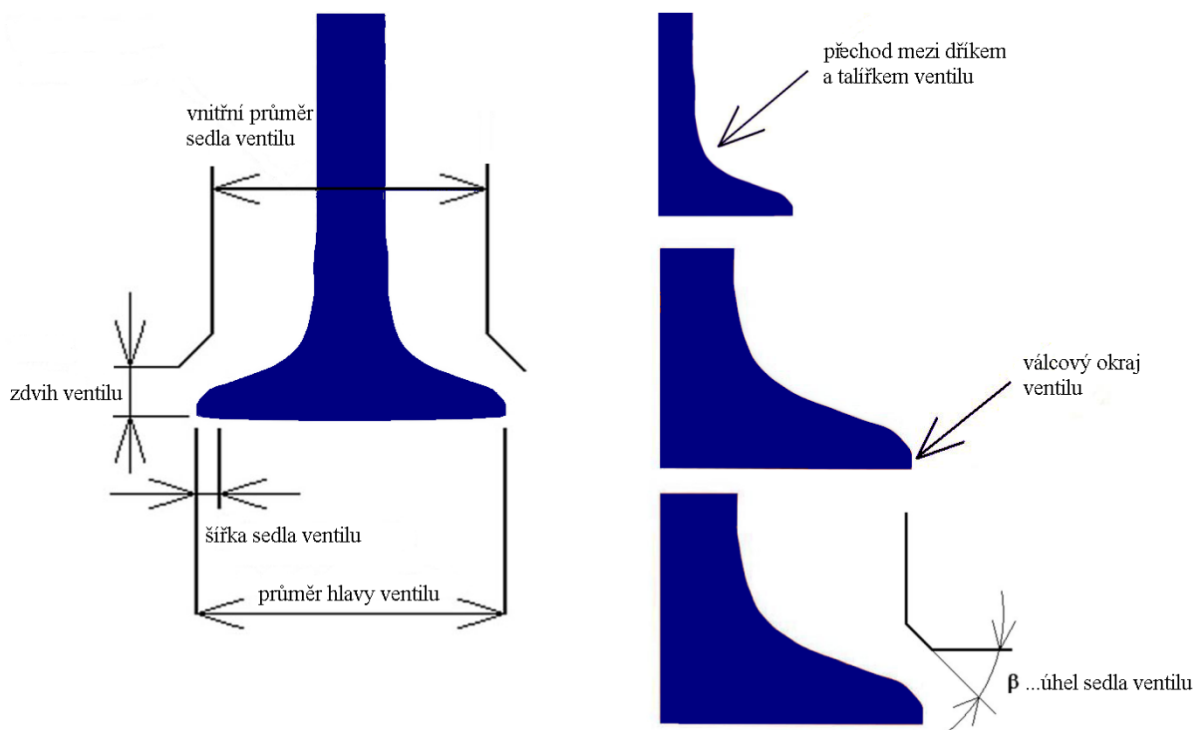
- u sacích ventilů je styčná plocha sedla ventilu o 40% menší (menší tepelné namáhání)
- příliš velká styčná plocha → zhoršení těsnosti a přestupu tepla
- příliš malá styčná plocha → zvýšení namáhání styčné plochy
- přechody kuželovými plochami (15 až 75°) v sedle ventilu hlavy válce (zlepšení proudění, zmenšení šířky sedla ventilu)

d.) přechodová plocha mezi dříkem a talířkem ventilu

- musí být pozvolná
- tvořen vydutým zaoblením a přechodovým kuzelem (lepší tuhost ventilu, odvod tepla a aerodynamické vlastnosti)

e.) válcový okraj ventilu

- zvýšení tuhosti talířku ventilu



Obr. 52 Geometrické vlastnosti ventilu

## 7.4 Průtokový součinitel

Průtokový součinitel charakterizuje průtokové vlastnosti kanálů. Hodnota průtokového součinitele je ovlivněna konstrukcí sacího kanálu, geometrií ventilu, polohou ventilu vůči stěně válce motoru a průběhem tlaku v sacím kanále. Průtokový součinitel je bezrozměrné číslo a je vyjádřen vztahem:

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_t} \quad (56)$$

$\dot{m}$  ... skutečný hmotnostní průtok [kg.s<sup>-1</sup>]

$\dot{m}_t$  ... teoretický hmotnostní průtok [kg.s<sup>-1</sup>]

$$\dot{m} = S \cdot \rho \cdot v \quad (57)$$

$S$  ... průřez kanálu [m<sup>2</sup>]

$\rho$  ... hustota média [kg.m<sup>-3</sup>]

$v$  ... okamžitá rychlost proudění [m.s<sup>-1</sup>]

Průtokový součinitel bývá obvykle dále násoben uzavíracím číslem  $\rho$ , které je mírou škrcení mezi ventilem a ventilovým sedlem. Průtokový součinitel je po vynásobení uzavíracím číslem funkcí okamžitého zdvihu ventilu, úhlu a šířky sedla, provedení sedla a ventilu. Pro zjednodušení je průtočná plocha definována pomocí uzavíracího čísla  $\sigma$  představujícího



nejmenší průměr dosedací plochy mezi sedlem a ventilem. Díky tomuto zjednodušení se průtočná plocha mění lineárně se zdvihem ventilu.

Vztah pro uzavírací číslo  $\sigma$ , kde se neuvažuje vliv dříku ventilu:

$$\sigma = \frac{S_V}{S_K} = \frac{\pi \cdot d_V \cdot h}{\frac{\pi \cdot d_V^2}{4}} = \frac{4 \cdot h}{d_V} \quad (58)$$

$S_V$ ... válcová plocha mezi ventilem a sedlem ventilu	[mm <sup>2</sup> ]
$S_K$ ... plocha kanálu v místě vnitřního průměru sedla	[mm <sup>2</sup> ]
$d_V$ ... průměr ventilu	[mm]
$h$ ..... výška zdvihu ventilu	[mm]

## 7.5 Přepřňování

Pro zvýšení výkonu motoru existují následující možnosti:

- zvětšení zdvihového objemu, zvýšení počtu válců
- zvýšení otáček motoru
- zvýšení středního efektivního tlaku

Vztah pro efektivní výkon pístového spalovacího motoru:

$$P_e = i_v \cdot V_H \cdot p_e \cdot \frac{n}{60 \cdot k} \quad (59)$$

$i_v$ ..... počet válců motoru	[-]
$V_H$ ... zdvihový objem válce	[m <sup>3</sup> ]
$p_e$ .... střední efektivní tlak na píst	[Pa]
$n$ ..... otáčky motoru	[min <sup>-1</sup> ]
$k$ ..... otáčkový činitel ( pro čtyřdobý motor $\tau = 2$ , pro dvoudobý motor $\tau = 1$ , počet otáček potřebných pro jeden expanzní zdvih)	[-]

Při vývoji motorů pro osobní automobily je kladen důraz na co možná nejvyšší výkon ovšem ne za cenu zvýšení hmotnosti motoru, snížení kompaktnosti motoru nebo snad snížení životnosti motoru. Proto se nejčastěji zvyšuje výkon zvýšením středního efektivního tlaku, což je podstatou přepřňování. Zvýšení středního efektivního tlaku je možné za předpokladu spalování většího množství paliva, což pro dokonalé hoření znamená dodávku většího hmotnostního množství vzduchu.

Přepřňování může být uskutečněno pomocí rezonančního potrubí, pomocí mechanických dmychadel (kompresorů) nebo pomocí turbodmychadel (jednostupňové, dvoustupňové).

## 8. Systém triflux

Systém triflux měla v úmyslu používat automobilka Lancia, a to v závodních vozech rallye. V následující části bych chtěla uvést historii předcházející tomuto systému a představit systém triflux jako takový.

Skupiny pro rallye byly od roku 1981 tři, a to skupina A (zastupující produkční cestovní vozy), skupina C (zastupující sportovní prototypy) a skupina B (zastupující speciály pro rallye). Podmínkou bylo 200 vyrobených vozů za rok a z nich vycházejících 20 vozů s jakoukoli sportovní úpravou bez omezení.

Tedy po zřízení skupiny B začala Lancia uvažovat o nahrazení modelu Stratos, nástupcem byla Lancia 037 představená roku 1983, první oficiální rallye vůz pro skupinu B, konkurent pro Audi Quattro. Čtyřválcový motor Fiat o objemu 1998 ccm (254 kW, 16v, OHC) byl umístěn před zadní poháněnou nápravou a byl přepínaný kompresorem. Automobil vážící 960 kg nebyl příliš bezpečný pro posádku, jelikož velké množství dílů bylo vyrobených z plastu.



Obr. 53 Lancia 037 [32]

Lancia 037 získala v roce 1983 titul nejlepšího rallye auta, ale vývoj byl u konce.

V roce 1985 nastupuje nový vůz pro skupinu B, Lancia Delta S4, která v tomto roce obsadila první dvě místa. Jak již název napovídá, vůz měl pohon všech kol, kovový podvozek a rám, karoserie byla z uhlíkových vláken. Stroj poháněl čtyřválcový motor Abarth 233 ATR o objemu 1759 ccm (440 kW, 16v, DOHC). Specialitou Lancie S4 byl ovšem systém volumex, tedy systém sestávající z kompresoru Abarth a turbodmychadla KKK. Tento systém řešil problém tzv. turbo díry, kdy došlo k vylepšení průběhu točivého momentu v širokém rozpětí otáček.



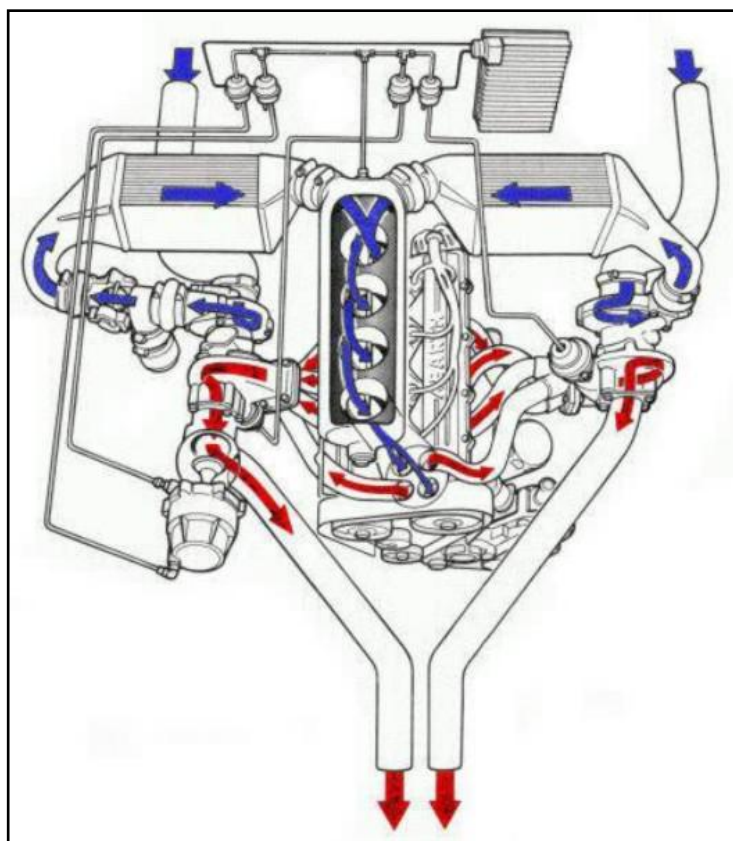
Obr. 54 Lancia Delta S4 [32]

Skupina B se díky neustálému technickému vývoji začala stále více vymykat kontrole, proto se začalo s přípravou skupiny S, skupiny pro sportovní prototypy, kde stačilo k homologaci deset vyrobených exemplářů. Pro skupinu S byla také vytvořena Lancia ECV1 (Experimental Composite Vehicle). Po tragické události v roce 1986, kdy na korsické rallye došlo k havárii vozu Lancia S4 a úmrtí dvoučlenné posádky, byly skupiny B i S zakázány. Vzhledem k těmto skutečnostem se tedy skupina S nikdy nestala součástí mistrovství světa.

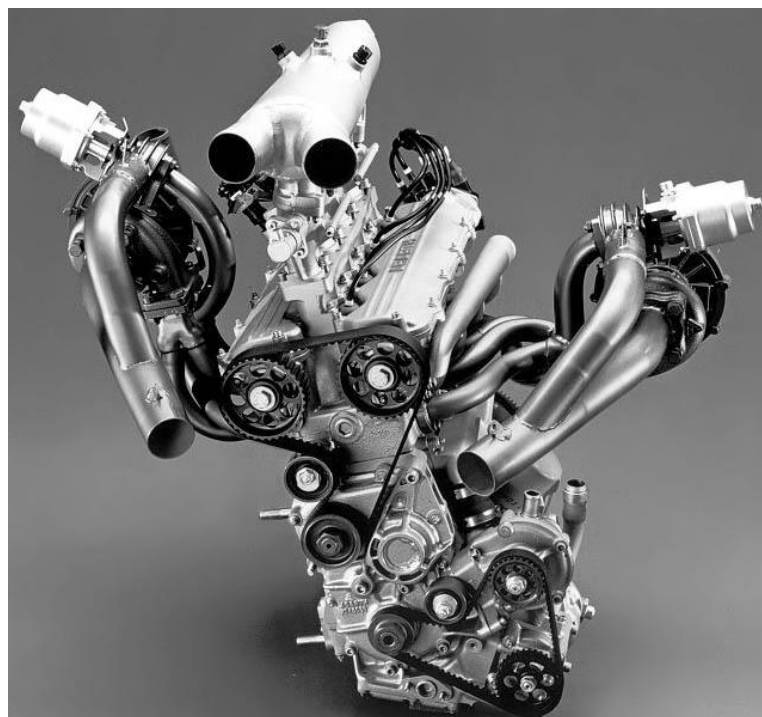
Lancia ECV1 vycházející z vozu Lancia S4. Karoserie byla vyrobena z lehkého a pevného uhlíkového kompozitu, pohon zajišťoval čtyřválcový motor o objemu 1759 ccm (447 kW) umístěný nad zadní nápravou disponující náhonem na všechna kola. A právě u tohoto prototypu se objevil unikátní systém s názvem triflux. Šlo o systém osazený dvěma turbodmychadly pracujícími v závislosti na otáčkách, což umožňovalo dosažení výkonu pohybujícího se na hranici 450 kW.

Došlo k poupravě rozložení hlavy válce, což mělo vylepšit možnosti seřízení. Klasické rozložení ventilů by bylo vzhledem k použití dvou turbodmychadel náročné na výrobu. Čtyři ventily v každém válci jsou uspořádány netradičně, se sacím a výfukovým ventilem na každé straně hlavy válce. Díky tomu lze sběrné výfukové potrubí umístit z každé strany motoru a sací potrubí vstupuje centrálně a to buď nezávisle, nebo sloučené v jedno potrubí. Systém také způsobuje vylepšení distribuce tepla v hlavě válce, tedy pomáhá vylepšit chlazení motoru.

Dvě turbodmychadla jsou propojena v modulární přepínající jednotku, kde první turbodmychadlo je použito při nízkých otáčkách a druhé turbodmychadlo pracuje od středních otáček. Takto je zajištěn stálý přísun stlačeného vzduchu v celém rozsahu otáček, vysoký točivý moment je již od nízkých otáček a zamezí se tzv. „turbo díře“. Vzduch po stlačení turbodmychadlem postupuje do mezichladiče stlačeného vzduchu a dále do válce motoru. Díky kompaktnosti motoru je zde větší volnost při navrhování výfukového systému.



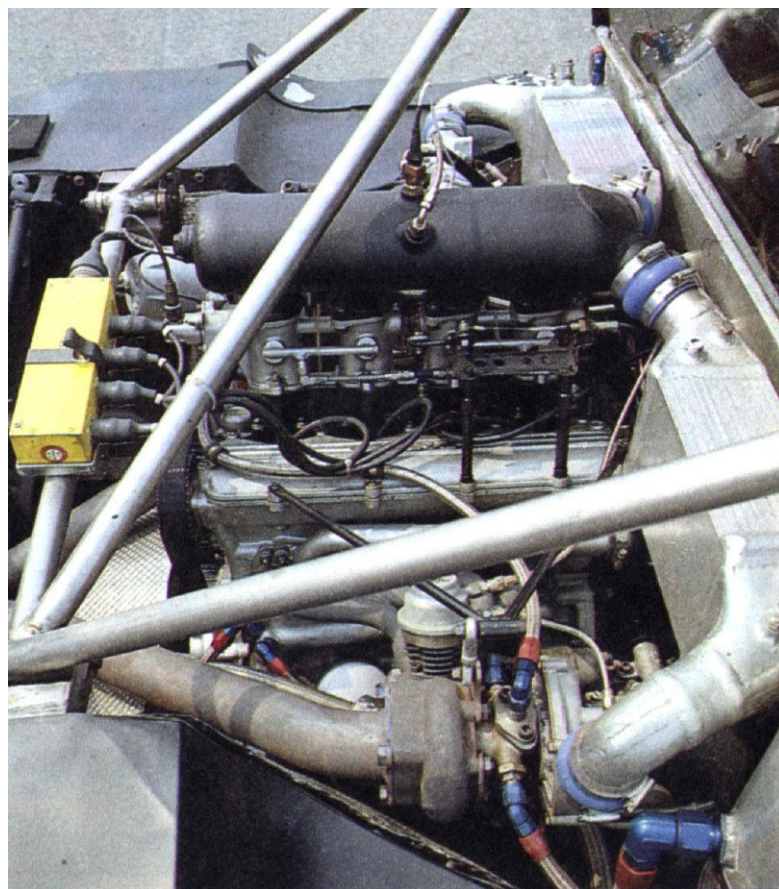
Obr. 55 Systém triflux [33]



Obr. 56 Motor vozu Lancia ECV1 [33]



Po Lancii ECV 1 se objevil model ECV 2. U tohoto vozu šlo jen o aerodynamickou optimalizaci a došlo i k vylepšením systému řízení.



Obr. 57 Lancia ECV2 [33]

## 9. Digitalizace reálných objektů

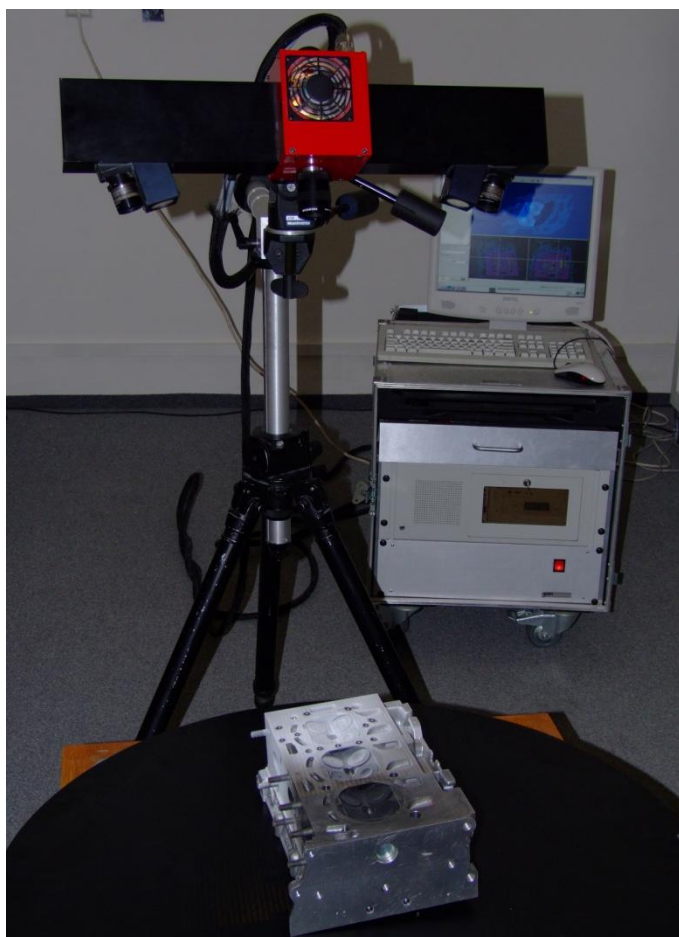
K převedení třírozměrného reálného objektu do digitální podoby je zapotřebí 3D skener. Já jsem k převedení hlavy válce, respektive spalovacího prostoru a profilu sacího kanálu využila 3D skener ATOS od firmy GOM, který je k dispozici na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství.

Základním principem 3D skenerů je snímání povrchu objektu v diskrétních bodech. Jednotlivé skenery se dělí podle:

- způsobu snímání dat (bezdotykové, dotykové)
- velikosti zařízení (mobilní, stacionární)
- dosahované přesnosti (vysoká, běžná přesnost)
- principu digitalizace (optické, mechanické, laserové, ultrazvukové, destruktivní, rentgenové skenery)

Dále se 3D skenery liší svými parametry, kterými jsou:

- měřicí objemy
- přesnost a rozlišitelnost
- rychlost



Obr. 58 3D skener ATOS

Součástí většiny 3D skenerů je obrazový snímač, který slouží ke snímání povrchu objektu a vytvoření datové informace. Nejpoužívanější je CCD snímač.

Důležitou roli hrají 3D skenery zejména v oblasti reverzního inženýrství, tedy získávání 3D podoby ve formě dat již existující reálné součásti.

### 9.1 Systém ATOS (Advanced Topometric Sensor)

Systém ATOS je mobilní bezdotkový optický 3D skener určený pro nejrůznější aplikace. Systém ATOS je vhodný tam, kde je požadována vysoká hustota dat (technologie CAD, CAM, FEM). Hlavními přednostmi tohoto zařízení je tedy vysoké rozlišení, vysoká výkonnost, flexibilita, mobilita a jednoduchost ovládání. Využívá se v oblasti reverzního inženýrství, kontroly kvality, rychlé výroby prototypů, virtuální reality, přímého obrábění a

při simulacích vstřikování plastů nebo tažení plechu. Systém může být v rámci zvýšení efektivity doplněn rotačním stolem, svislým motorizovaným stolem, či vztažnou soustavou.

### 9.1.1 Rozdělení systémů ATOS

#### ATOS I

- nejlevnější
- pro aplikace s nižšími nároky na přesnost a kvalitu dat
- CCD snímač s rozlišením 800 000 obrazových bodů na snímek
- maximální měřicí rozsah 1000 x 800 mm (rozlišení 1 bod/1 mm)

#### ATOS II

- přesnější projekční jednotka
- laserové odměřování vzdálenosti od objektu
- vyšší rozlišení CCD snímače (1 400 000 obrazových bodů na 1 snímek)
- měřicí rozsah 2000 x 1600 mm (rozlišení 1 bod/1 mm)



Obr. 59 ATOS II [38]

#### ATOS III

- výkonnější zdroj světla
- pro nejnáročnější aplikace
- měření velkých objektů
- vyšší rozlišení CCD snímače (4 000 000 obrazových bodů na 1 snímek)
- měřicí rozsah 2000 x 2000 mm (rozlišení 1 bod/1 mm)

#### ATOS SO

- pro měření malých dílů (od 24mm x 30mm do 300 mm x 300 mm)
- ATOS I SO, ATOS II SO, ATOS SO 4M

#### ATOS XL

- kombinace systému ATOS a Tritop
- snímání objektů takřka neomezené velikosti
- informace o barevné textuře povrchu snímaného předmětu





Obr. 60 ATOS Tritop [35]

### 9.1.2 Nastavení a kalibrace systému ATOS

Kalibrace se provádí před každým novým snímáním dat. Někdy kalibrace probíhá i během samotného měření, což je způsobeno rozladěním objektivu. Při kalibraci se používají speciální desky (200 x 160 mm) dodané výrobcem. Tyto kalibrační desky se vybírají podle tabulek daných výrobcem k danému typu objektivu kamer, které mají různé ohniskové vzdálenosti. Kalibrace je prováděna pomocí instruktážního programu v softwarovém rozhraní přístroje ATOS. Po kalibraci se musí také správně zaostřit objektivy skeneru a musí být nastaven jas kamer.

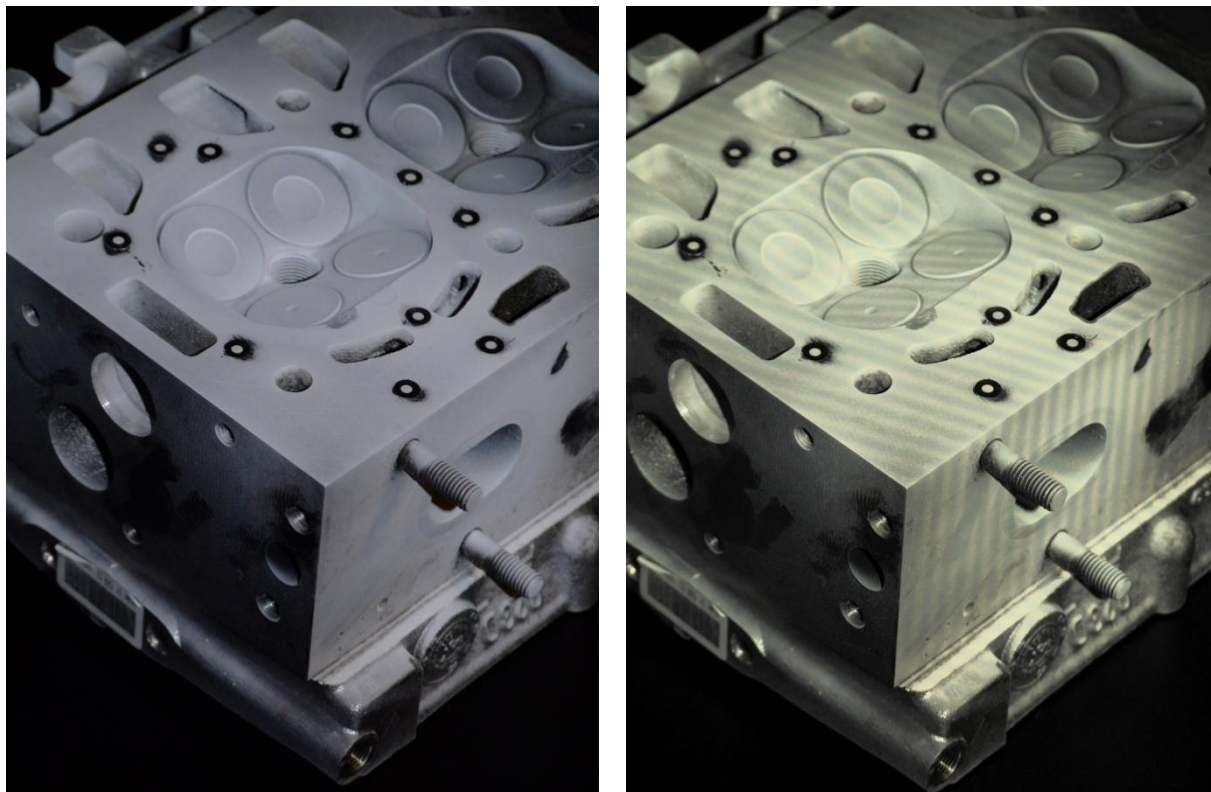
### 9.1.3 Proces měření

Systém ATOS se skládá z projekční světelné jednotky a dvoukamerového CCD systému, který převádí v reálném čase naměřená data do třírozměrných bodových souřadnic.

Před skenováním je třeba předmět důkladně očistit a pak na něj nebo v jeho blízkosti pravidelně umístit pomocné optické značky. Pomocí těchto značek systém vypočítá pozici měřících senzorů a změřené hodnoty transformuje do souřadného systému objektu. Dále je třeba skenovaný předmět umístit k tmavému pozadí (pozadí by mělo vytvářet se skenovaným objektem velký kontrast). Pokud je předmět příliš lesklý nebo dokonce průhledný, musí se ještě povrch skenovaného předmětu upravit pomocí křídového spreje, čímž se dosáhne matného povrchu.

Po nastavení a kalibraci skeneru ATOS se přístroj umístí do vhodné polohy vůči snímanému předmětu. Poté jsou na objekt promítnuty proužky světla a pomocí dvou kamer jsou snímány z různých úhlů. Skenovaný objekt se měří v několika pohledech a pozicích. 3D souřadnice jednotlivých pixelů jsou s vysokou přesností vypočteny pro každou kameru zvlášť, a to díky digitálnímu zpracování obrazu.

Měřicí hlava přístroje je připevněna na fotografickém stativu, tudíž se snadno nastavuje kolem snímaného objektu. Systém vyhodnocuje přesné pozice snímků díky pomocným značkám, tedy není nutné objekt skenovat pravidelně.



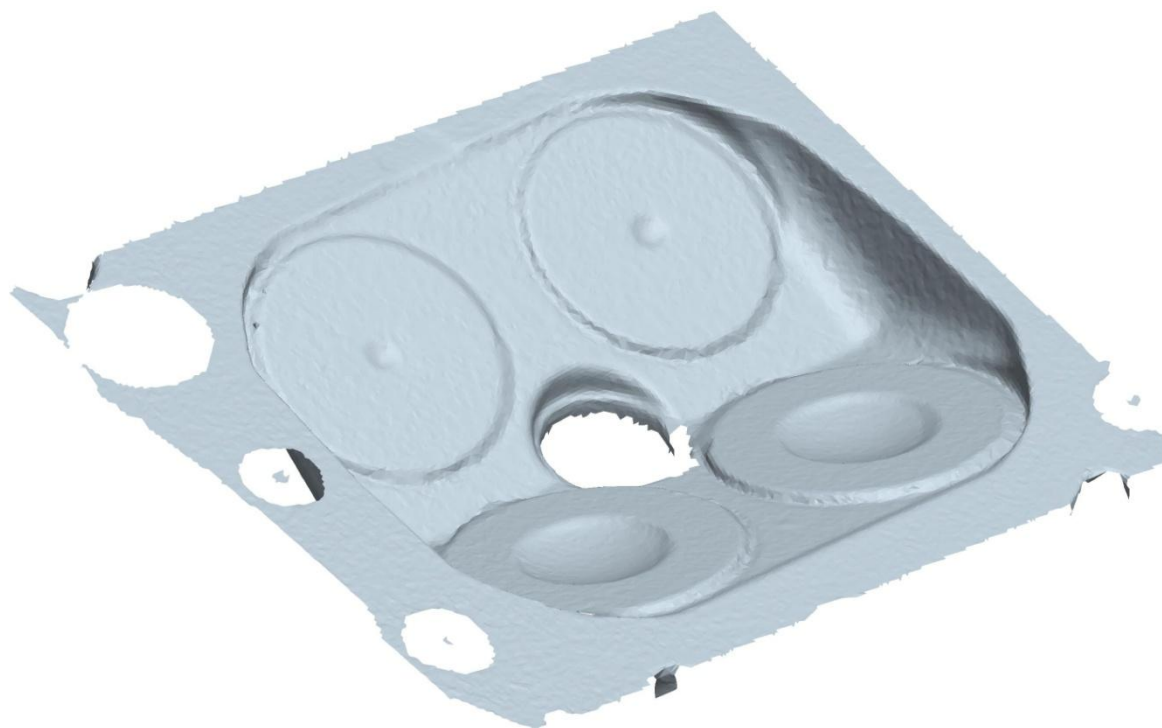
Obr. 61 Skenování hlavy válce 3D skenerem ATOS

#### 9.1.4 Výstupy z digitalizace

- optimalizovaná polygonální síť
- mrak bodů
- řezy
- obrysové a kontrastní křivky
- barevné mapy odchylek od CAD modelu
- protokol o měření

Po naskenování předmětu se vyberou všechny body a dojde k zobrazení naskenované plochy. K vykreslení je zapotřebí, aby kamery zaznamenaly aspoň tři optické značky, které jde v případě potřeby ručně vyhledat a nadefinovat.

Výsledkem skenování jsou diskrétní body nebo polygonální síť digitalizovaného objektu. Aby bylo možno naskenovaný objekt dále používat v CAD programu, je nutné jej upravit. Získané plochy jsou nahrazovány jednoduchými geometrickými objekty, jako jsou např.: válec, obdélník, rovinná plocha. Chceme, aby odchylka od naskenovaných dat byla co nejmenší, tyto geometrické objekty tedy umístíme tak, aby co nejpresněji kopírovaly reálnou součást.



Obr. 62 Naskenovaný model spalovacího prostoru převedený  
do programu Pro/ENGINEER

## 10. Modelování sacích kanálů

Po naskenování hlavy válce motoru Škoda 1,2 HTP a následném převedení získaných dat do CAD programu Pro/ENGINEER bylo nutné vytvořit právě na základě naskenovaného modelu spalovací prostor a sací kanály.

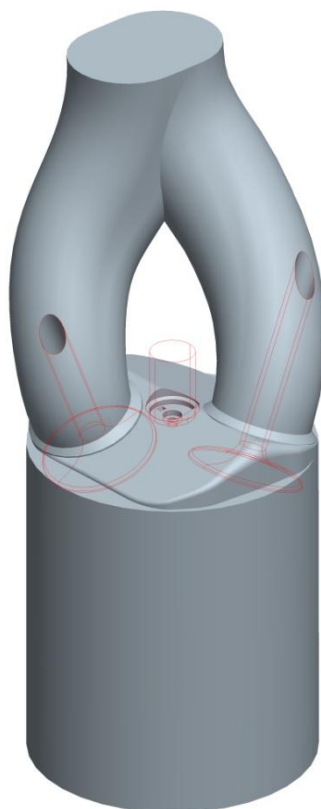
Střechovitý spalovací prostor byl doplněn válcem o průměru 76,5 mm a délce 86,9 mm, což odpovídá vrtání válce a zdvihu daného motoru. Dále byly namodelovány sací kanály, kde byly zachovány rozměry jak jejich kruhových vstupů do spalovacího prostoru válce, tak jejich společného elipsovitého vstupu do hlavy válce. Posledním krokem bylo vytvoření sacích ventilů a přidání zapalovací svíčky, která zasahuje do spalovacího prostoru a tak ovlivňuje proudění ve válci motoru.

Spalovací prostor a sací kanály jsem modelovala jako plný objem, kdežto sací ventily společně se zapalovací svíčkou byly od tohoto objemu odebrány. Výsledkem byl model připravený na export do CFD programu, kde probíhá simulace proudění právě objemem daného modelu.

V případě modelování sacích kanálů hlavy válce typu triflux jsem za základ použila již vytvořený spalovací prostor a válec motoru Škoda 1,2 HTP. Sací kanály vstupují u hlavy válce typu triflux shora a je tedy nutné brát zřetel zejména na demontáž zapalovací svíčky a prostor pro výfukové kanály.



Obr. 63 Model s klasickým umístěním sacích kanálů



Obr. 64 Model sacích kanálů hlavy válce typu triflux



## 11. CFD analýza proudění

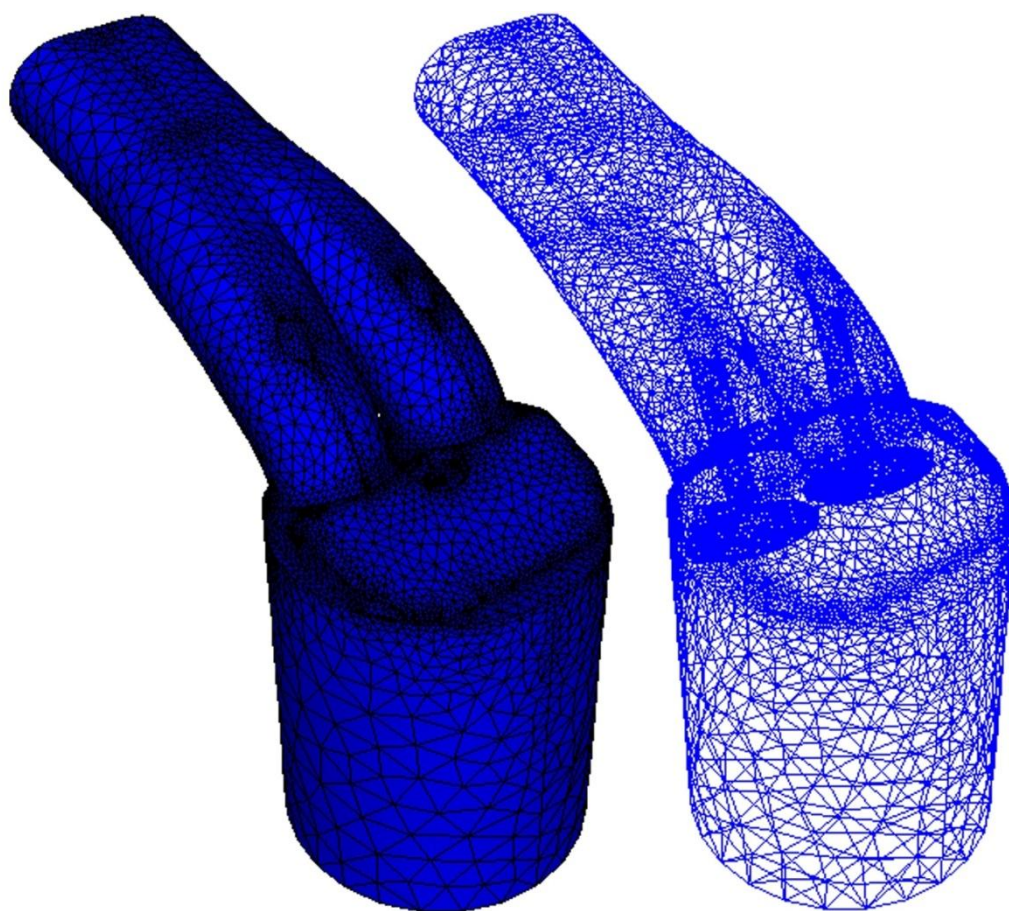
Nejdříve jsem oba modely, tedy model s klasickým uspořádáním a model s uspořádáním typu triflux, převedla do CFD prostředí. Dalším krokem bylo vytvoření neboli vygenerování sítě.

### 11.1 Vygenerování sítě

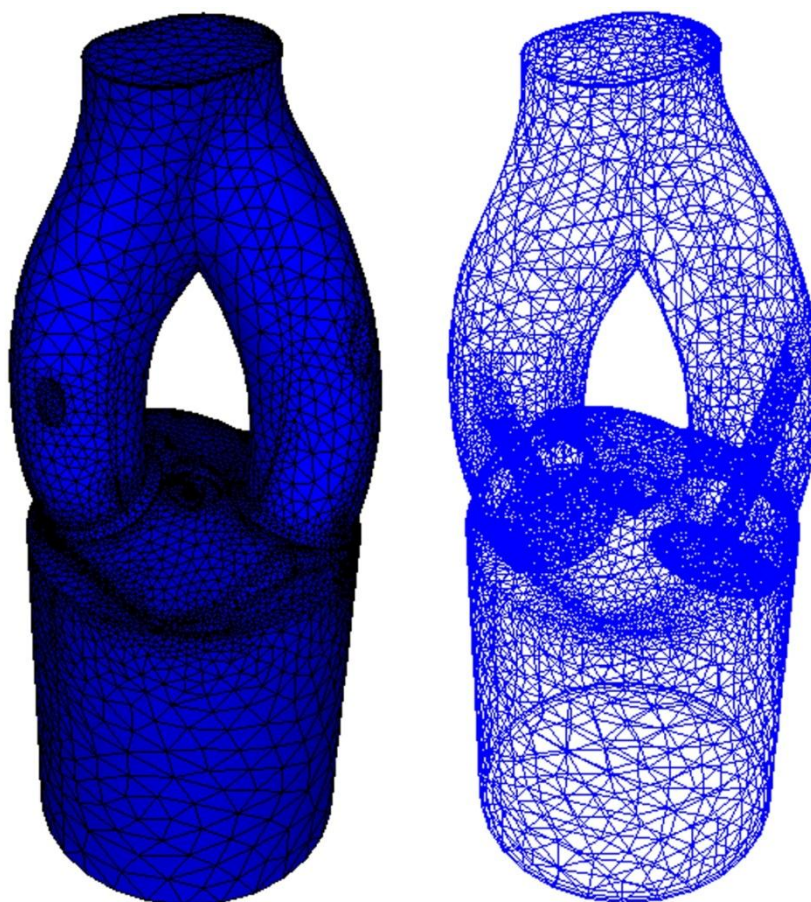
Před samotným vygenerováním sítě je třeba zvolit si velikost elementů, z kterých se skládá. Velikost elementů může být pro celý model jednotná nebo mohou být označeny oblasti či hrany, pro které je pak definována jiná velikost elementů. V případě obou modelů hlavy válce je vhodné zjemnit okolí spalovacího prostoru, ventilů a zapalovací svíčky.

Při vytváření sítě je třeba mít na mysli, že velikost elementů jednotlivých oblastí s rozdílnou jemností sítě musíme volit tak, aby program mezi nimi dokázal vytvořit přechod. Samozřejmě platí, že čím menší elementy sítě jsou zvoleny, tím větší jsou časové a hardwarové nároky na vygenerování sítě.

Po odzkoušení několika variant jsem nakonec zvolila velikost elementů 3 mm pro oblast sacího kanálu a válce motoru a 2 mm pro spalovací prostor, ventily a zapalovací svíčku. Tyto hodnoty se ukázaly jako vhodný kompromis mezi přesností, neboli efektivností sítě a časem potřebným k vygenerování sítě.



Obr. 65 Vygenerovaná síť u modelu s klasickým uspořádáním sacích kanálů



Obr. 66 Vygenerovaná síť u modelu s uspořádáním sacích kanálů typu triflux

## 11.2 Okrajové podmínky

Simulaci proudění vzduchu jsem prováděla pro stacionární stlačitelné turbulentní proudění, pro které jsem zadala následující parametry:

- hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] - mění svoji hodnotu v závislosti na stavové rovnici:

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (60)$$

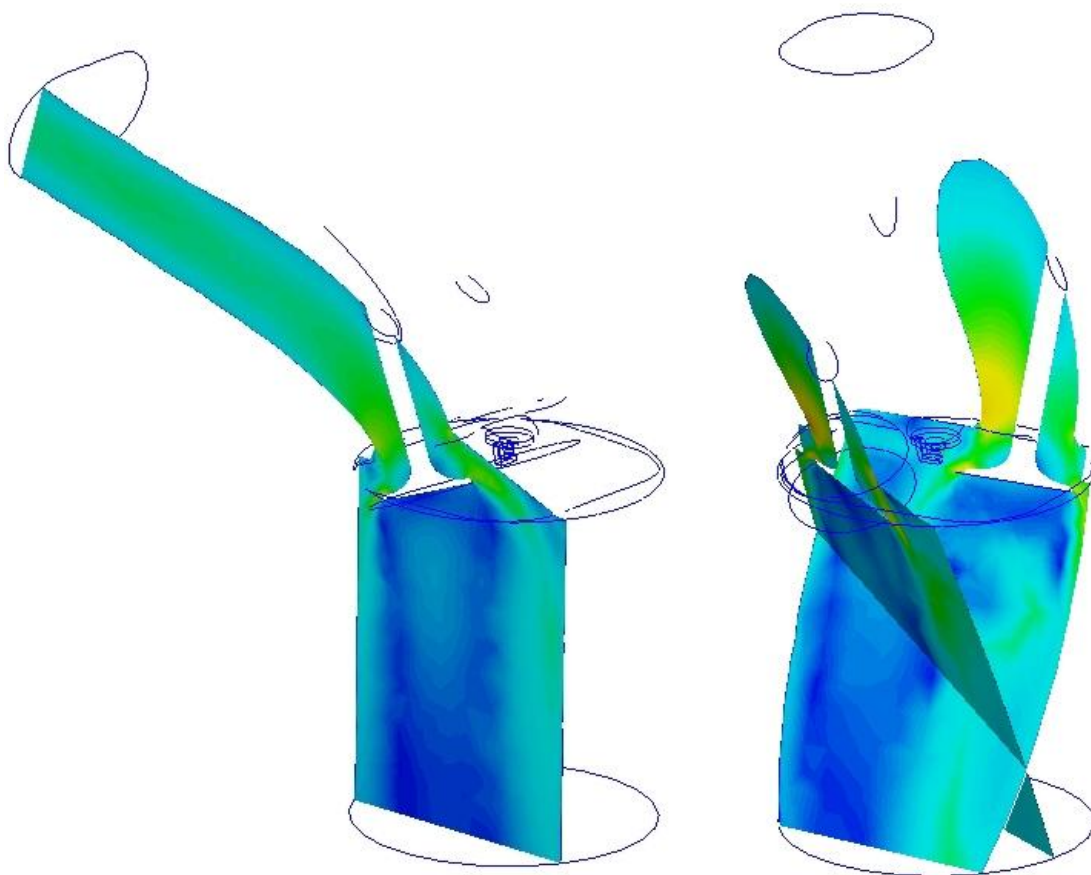
- |                     |   |
|---------------------|---|
| • měrné teplo       | $1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$               |
| • viskozita         | $1,817 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$                         |
| • tepelná vodivost  | $2,563 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| • stlačitelnost     | 1,4   |
| • plynová konstanta | $287,04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$             |
| • tlak              | 101325 Pa   |
| • teplota           | 19,85 °C  |
| • model turbulence  | k - $\epsilon$  |

Dále jsem zadávala hodnoty tlaku na vstupu do sacího potrubí a na výstupu z válce, přičemž důležité bylo vytvoření tlakového spádu neboli podtlaku. Na vstupu byla tedy zadána nulová hodnota tlaku vzhledem k tlaku atmosférickému a na výstupu taková, aby výsledný podtlak činil 10 kPa, což je hodnota odpovídající stavu při maximálním otevření škrtkové klapky.

### 11.3 Simulace proudění

Simulace byla provedena při různých velikostech zdvihu sacího ventilu jak pro model s klasickým uspořádáním sacích kanálů, tak pro model s uspořádáním triflux. Pro porovnání jsem si zvolila hodnoty v rozmezí 7 až 11 mm. Pro jednotlivé simulace proudění vzduchu modelem bylo požadavkem, aby se výsledek přiblížil realitě. Bylo tedy zapotřebí určité množství iterací vedoucích ke konvergenci (Tab. 1).

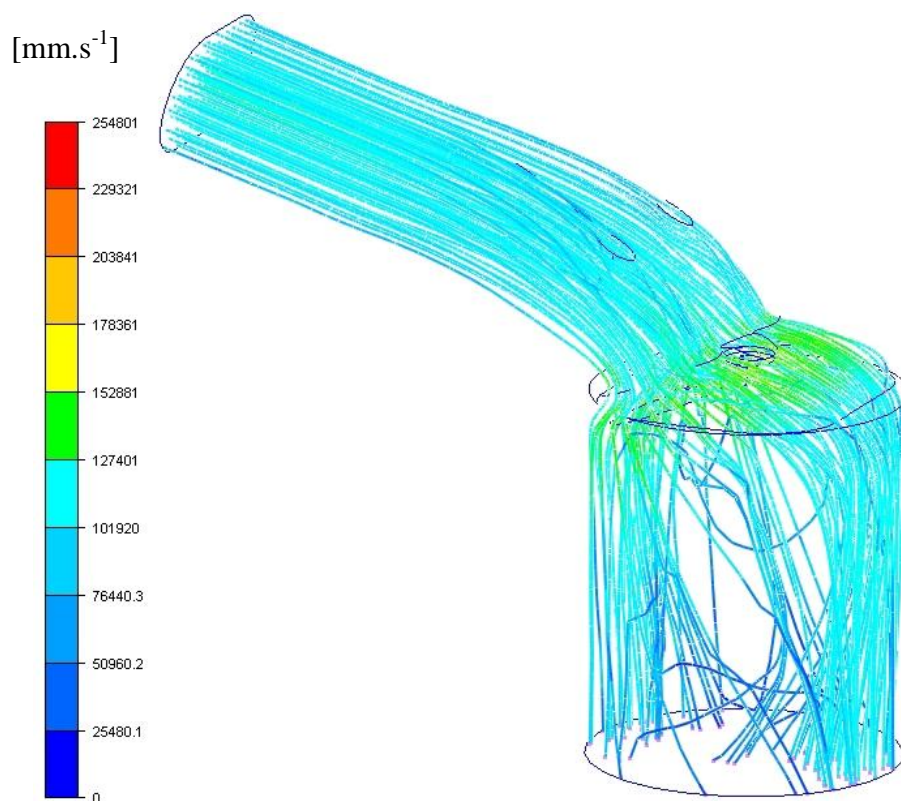
Po výpočtu jsem v rámci postprocesingu znázornila simulaci proudění vzduchu sacím kanálem a válcem motoru pro všechny varianty, vždy jako model s proudnicemi rychlosti a řez modelem osou ventilu s izoplochami rychlosti (Obr. 67).



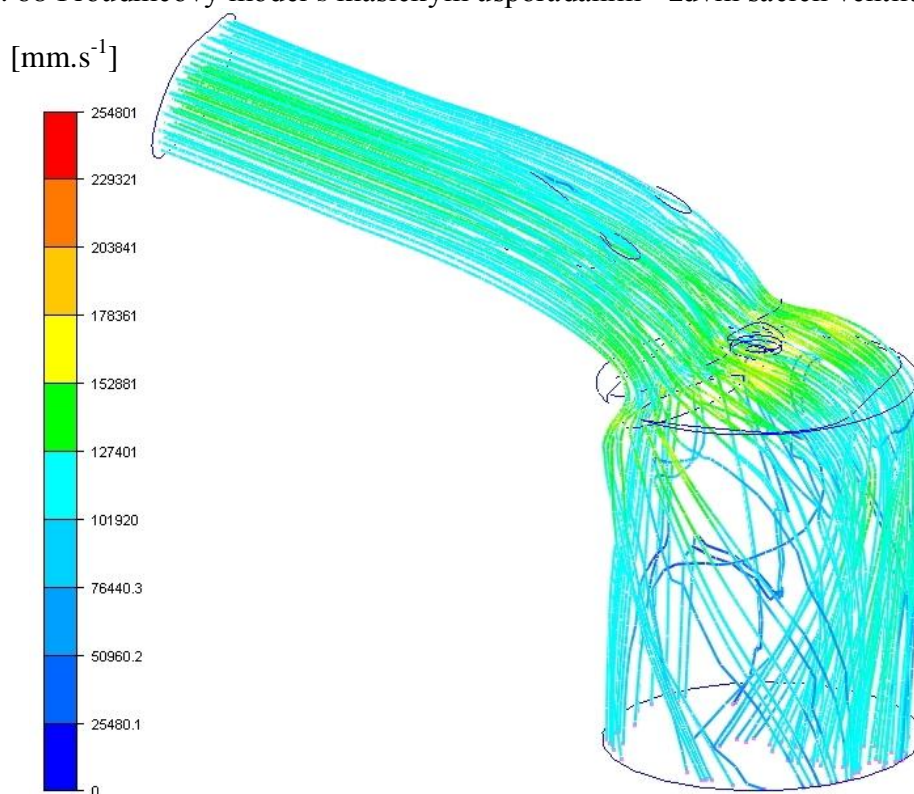
Obr. 67 Řezy modelů vedené osami ventilů



### 11.3.1 Modely s klasickým uspořádáním sacích kanálů

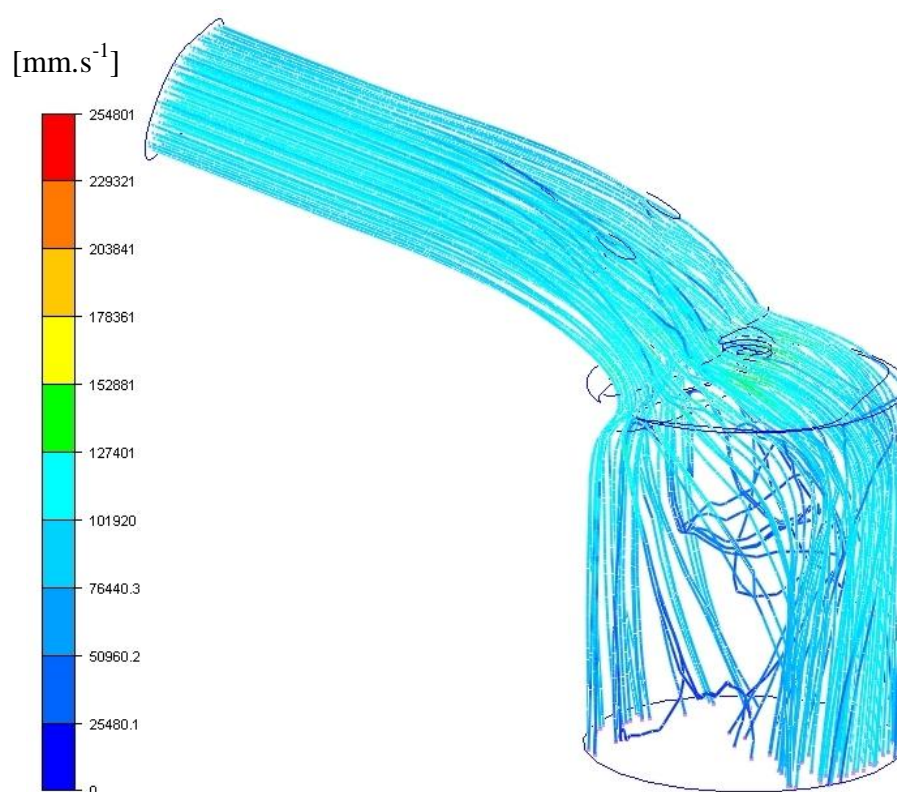


Obr. 68 Proudnicový model s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 7 mm

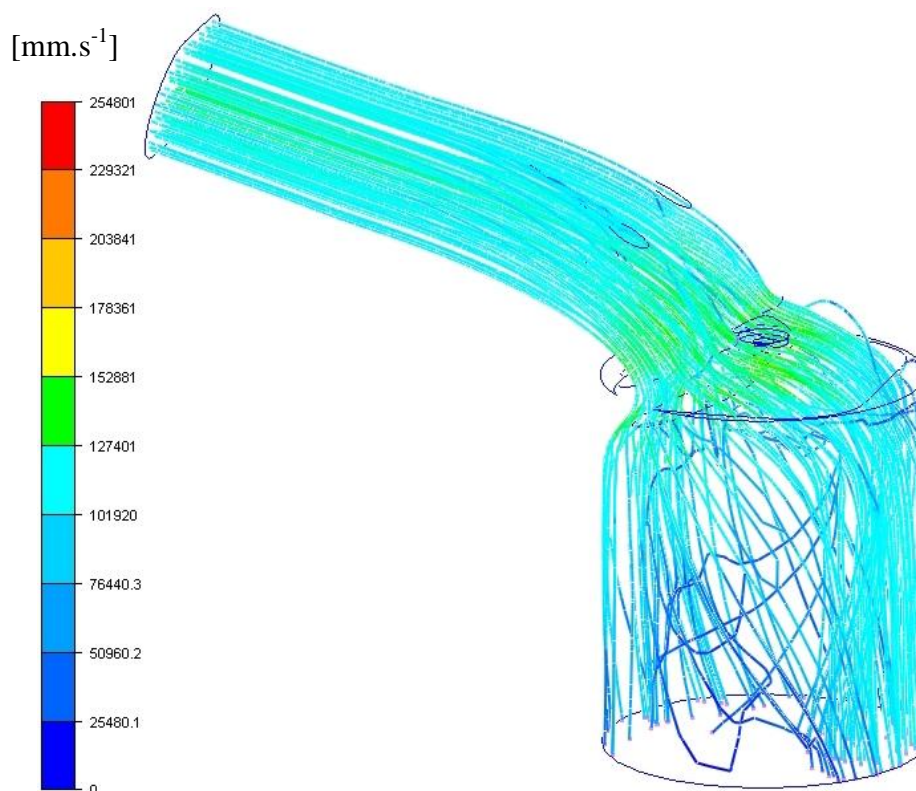


Obr. 69 Proudnicový model s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 8 mm

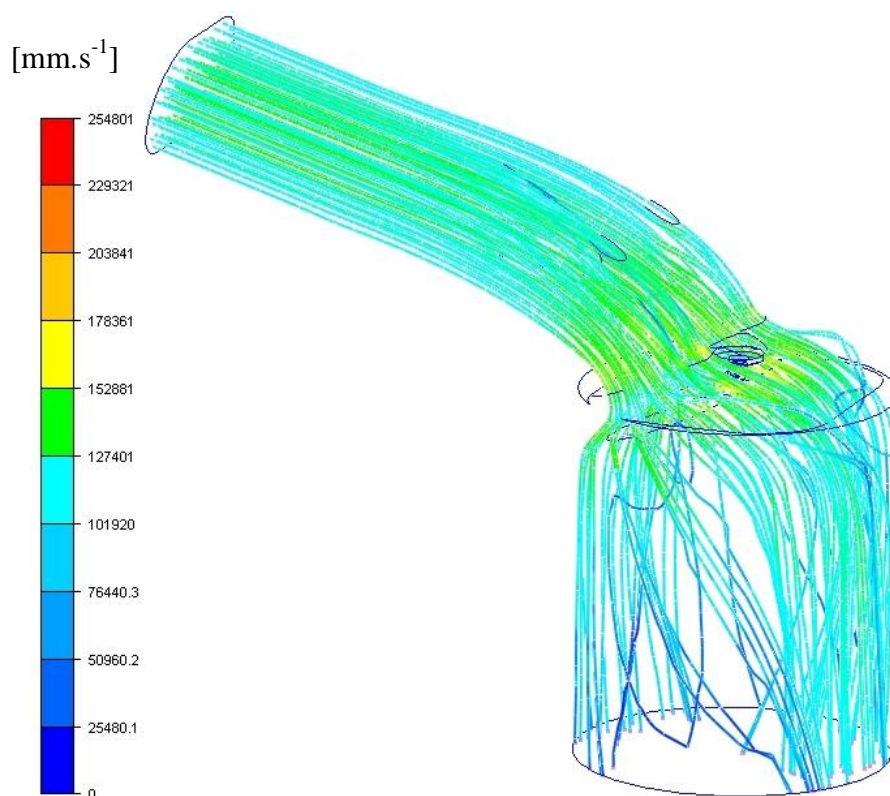




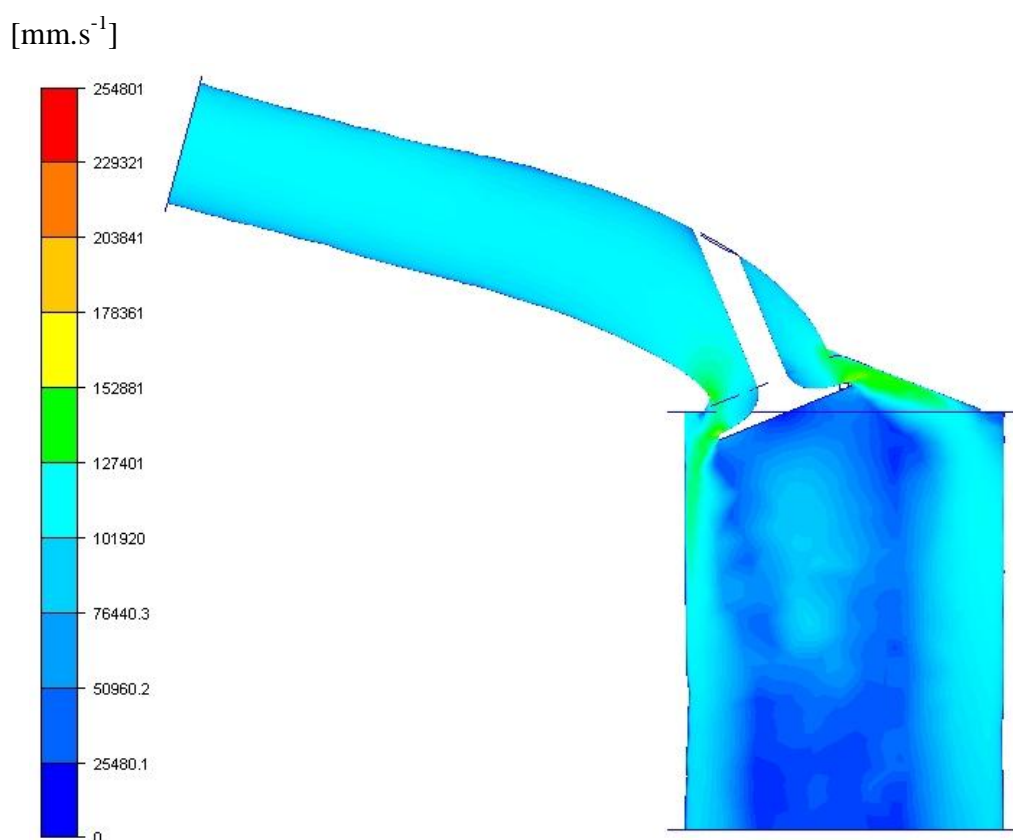
Obr. 70 Proudnicový model s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 9 mm



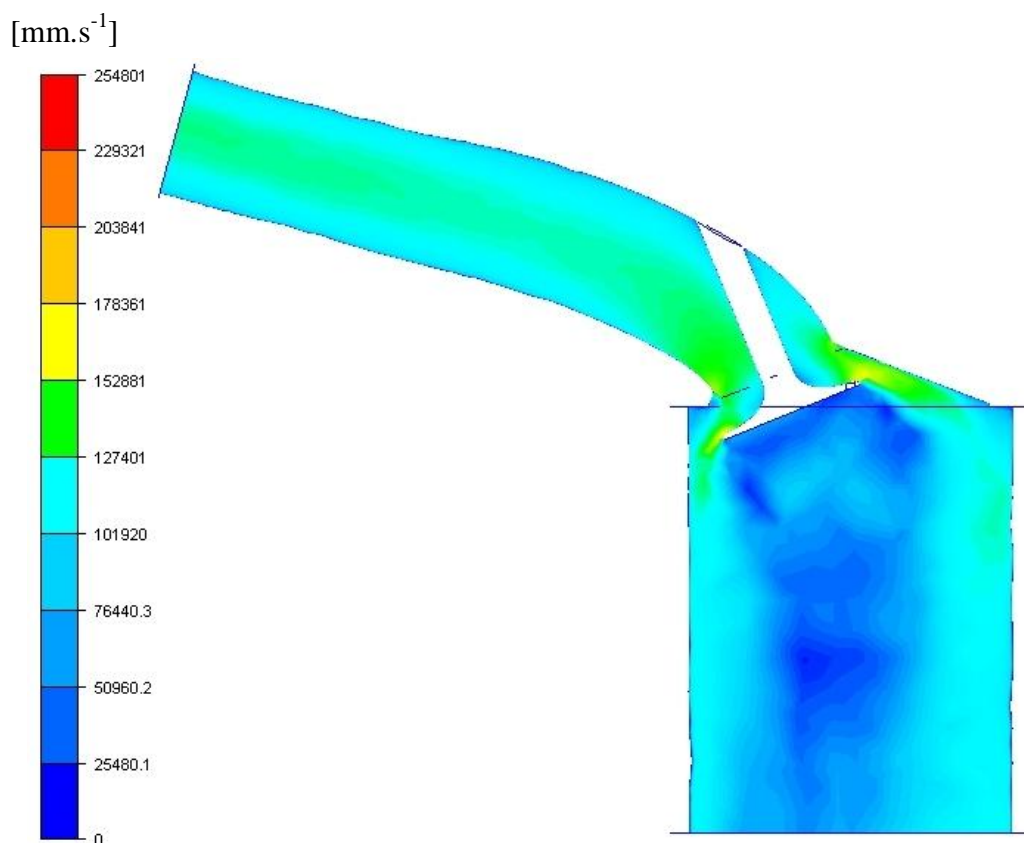
Obr. 71 Proudnicový model s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 10 mm



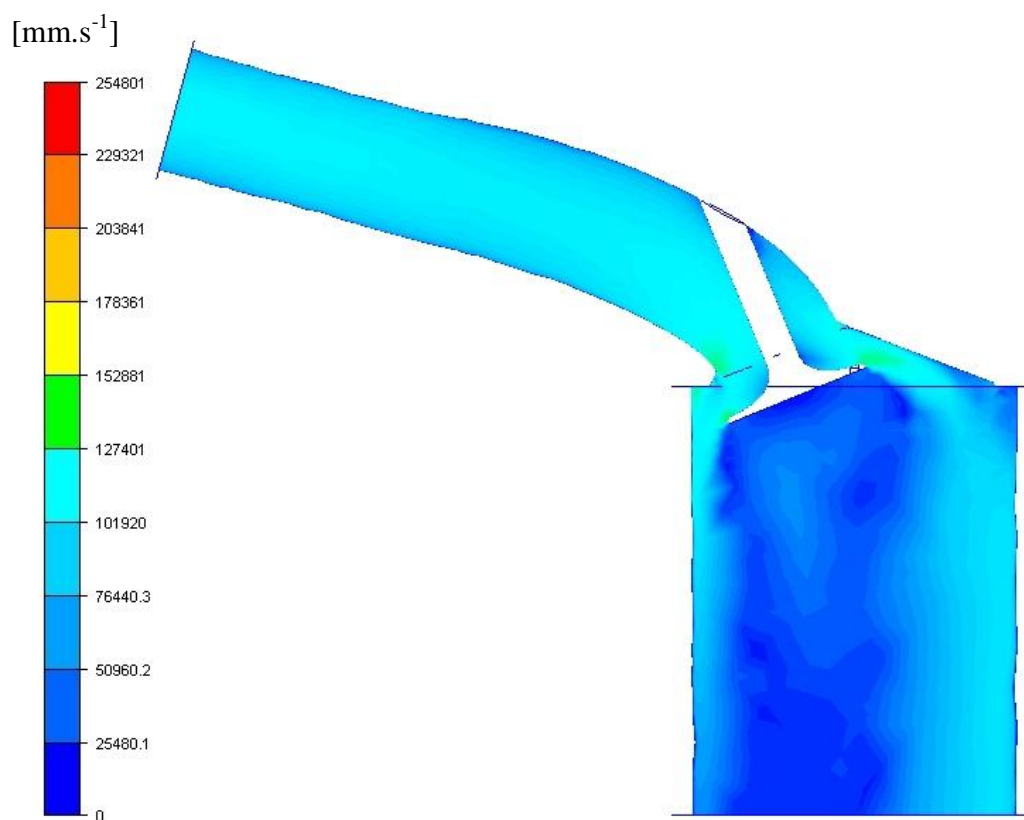
Obr. 72 Proudnicový model s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 11 mm



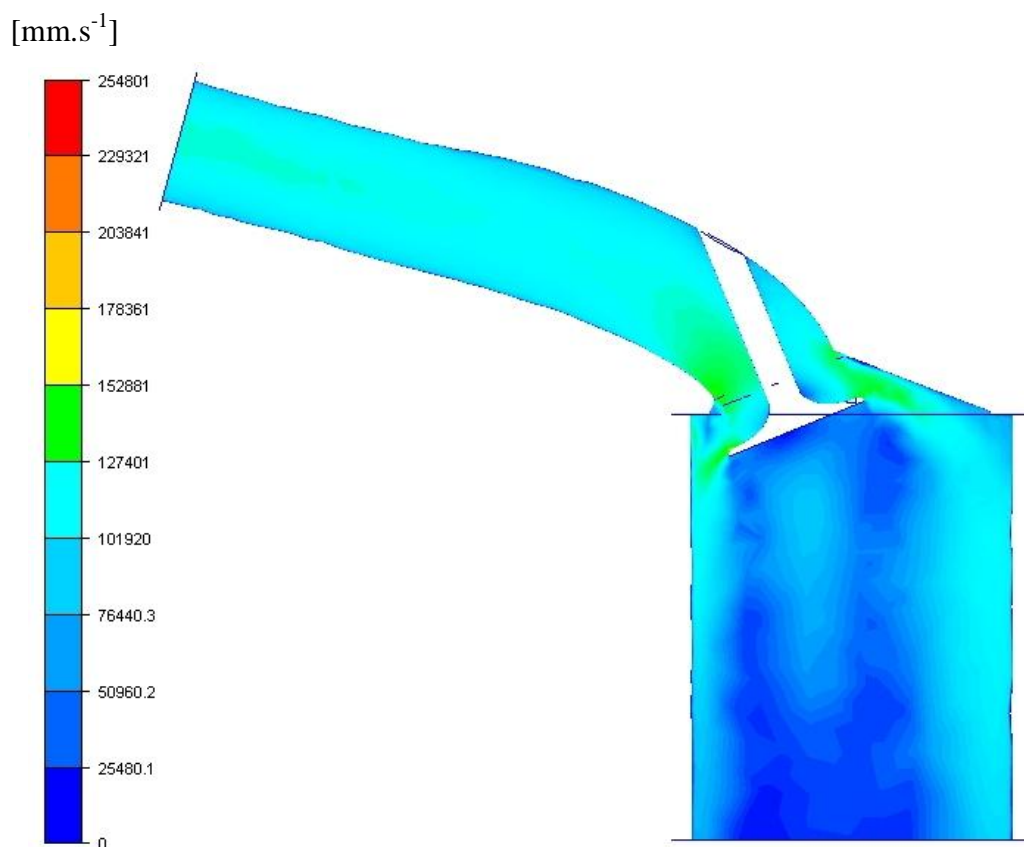
Obr. 73 Řez osou ventilu u modelu s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 7 mm



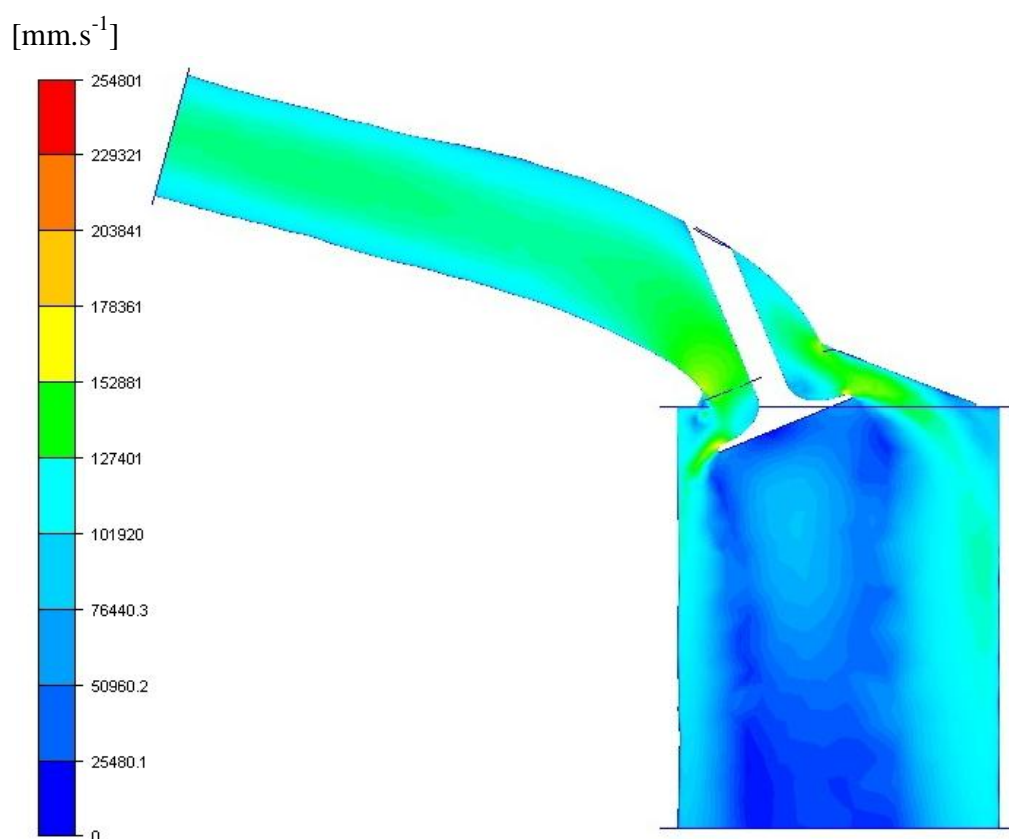
Obr. 74 Řez osou ventilu u modelu s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 8 mm



Obr. 75 Řez osou ventilu u modelu s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 9 mm



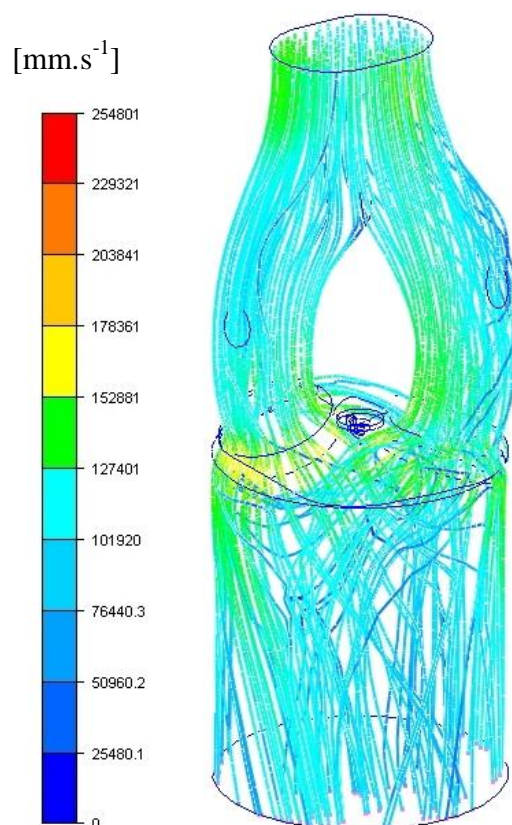
Obr. 76 Řez osou ventilu u modelu s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 10 mm



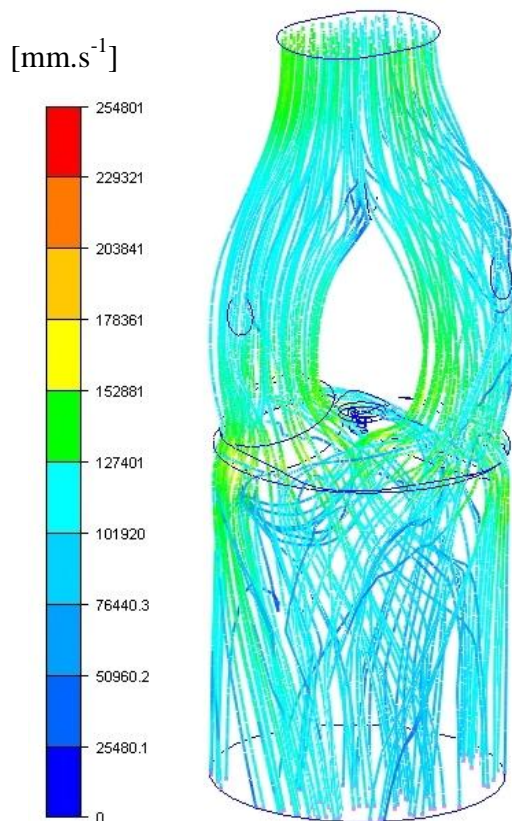
Obr. 77 Řez osou ventilu u modelu s klasickým uspořádáním - zdvih sacích ventilů 11 mm



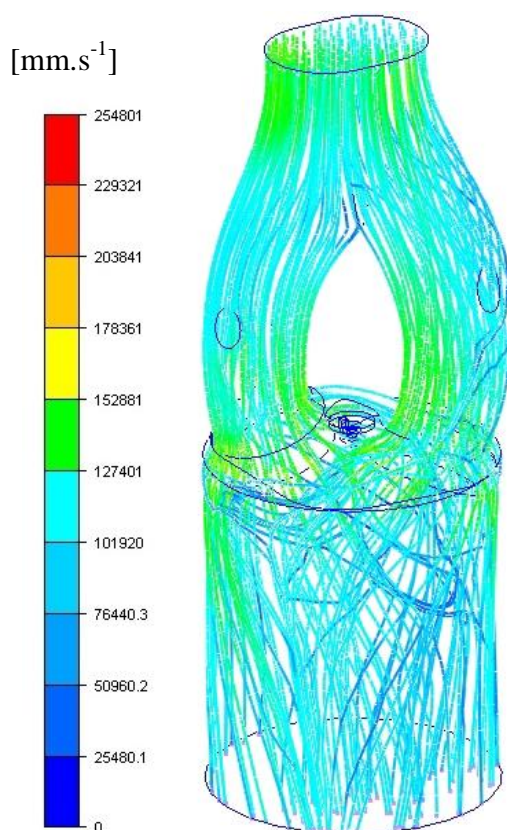
### 11.3.2 Modely s uspořádáním sacích kanálů typu triflux



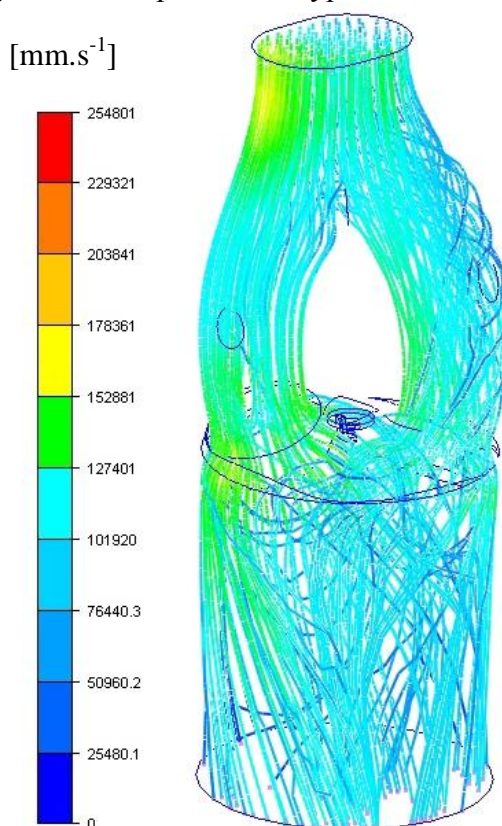
Obr. 78 Proudnicový model s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 7 mm



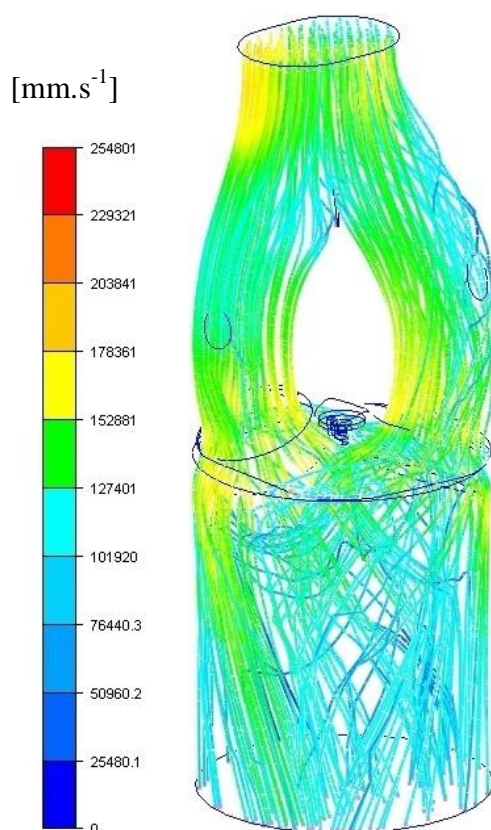
Obr. 79 Proudnicový model s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 8 mm



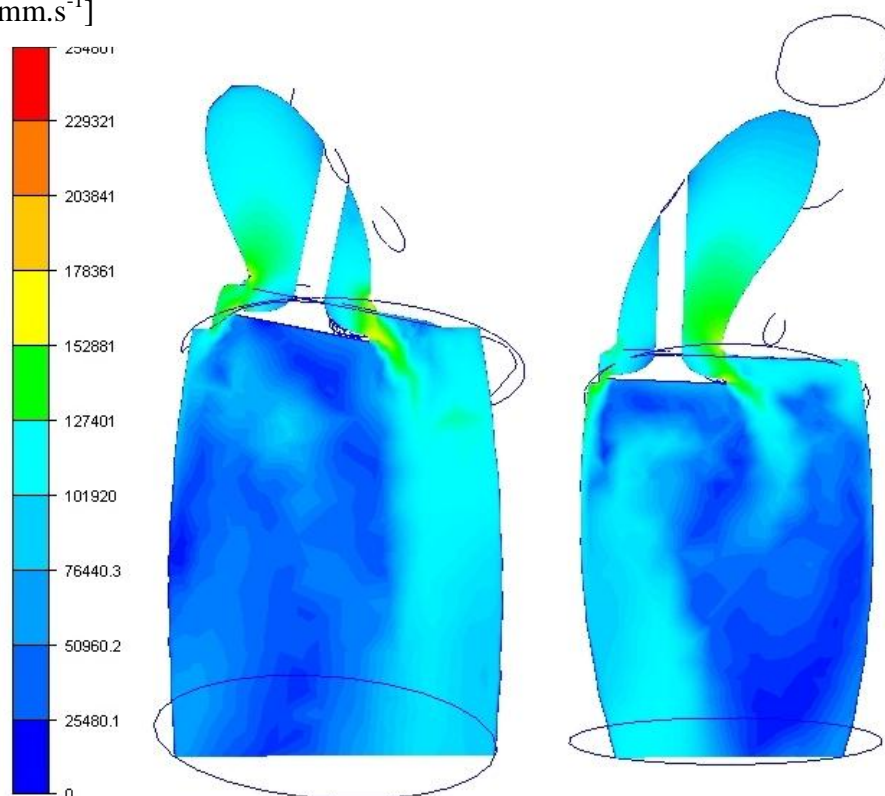
Obr. 80 Proudnicový model s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 9 mm



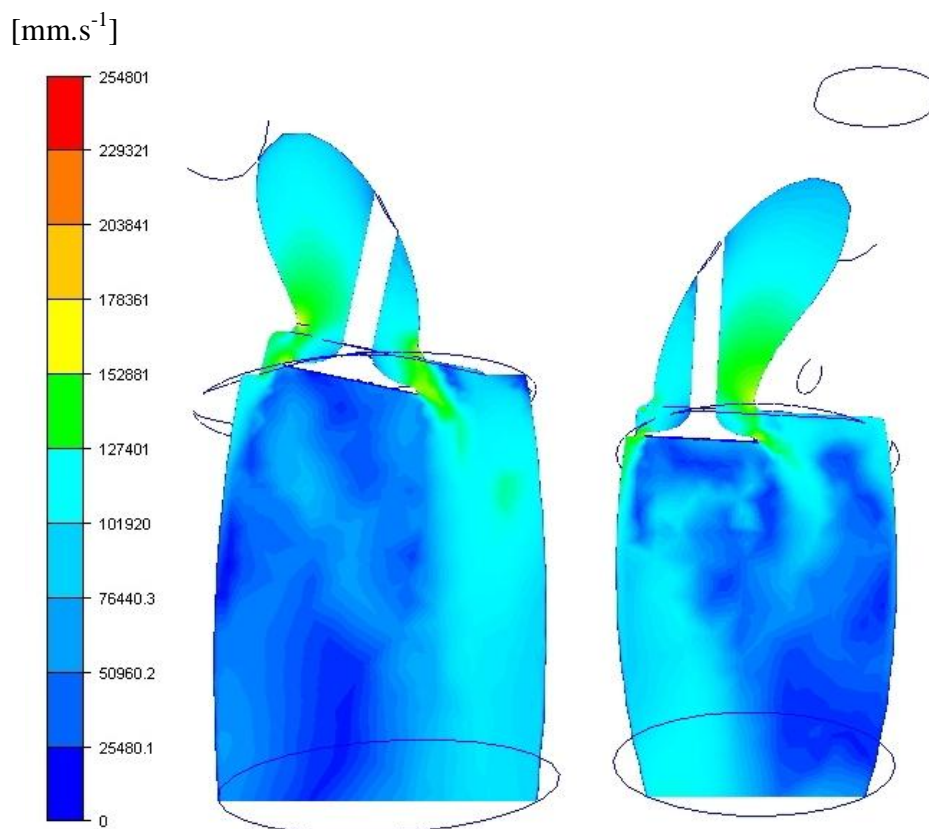
Obr. 81 Proudnicový model s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 10 mm



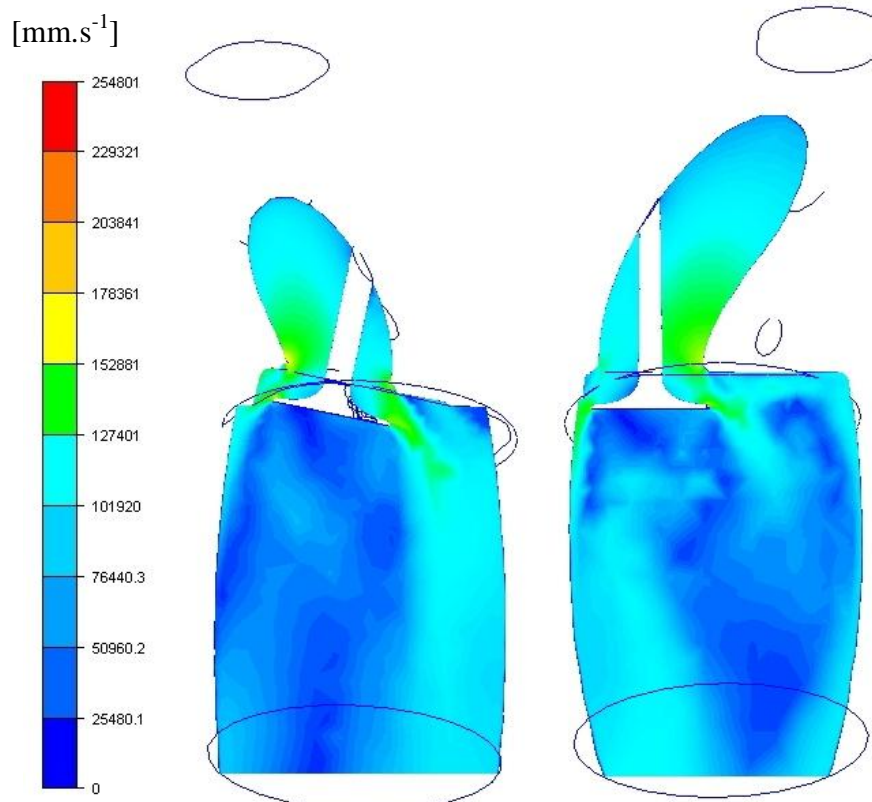
Obr. 82 Proudnicový model s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 11 mm  
[ $\text{mm.s}^{-1}$ ]



Obr. 83 Řezy osami ventilů u modelu s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 7 mm

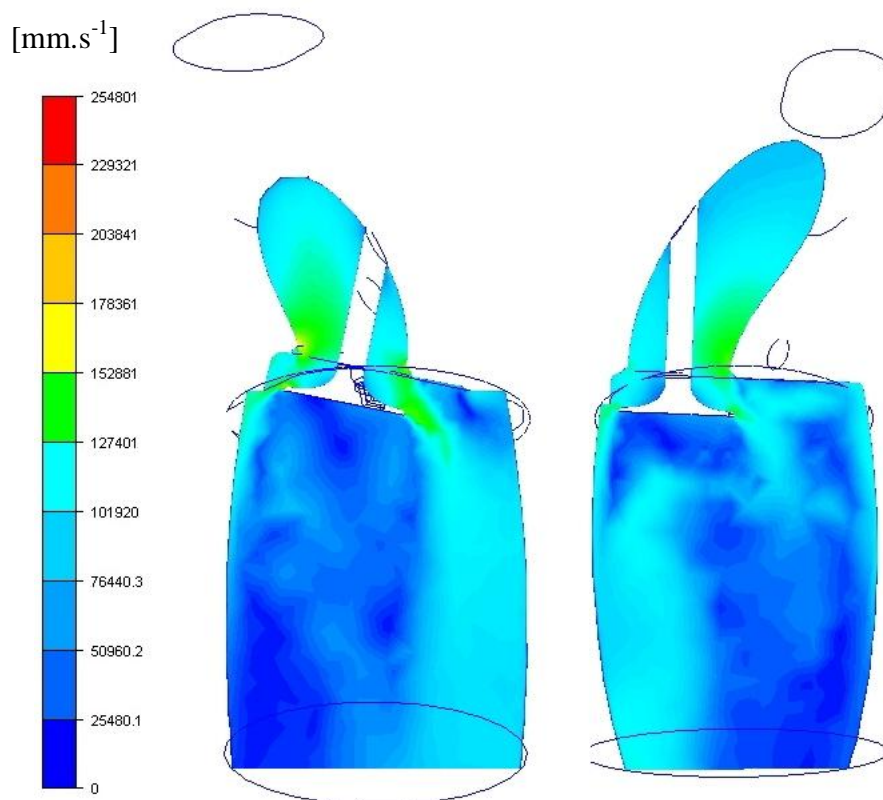


Obr. 84 Řezy osami ventilů u modelu s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 8 mm

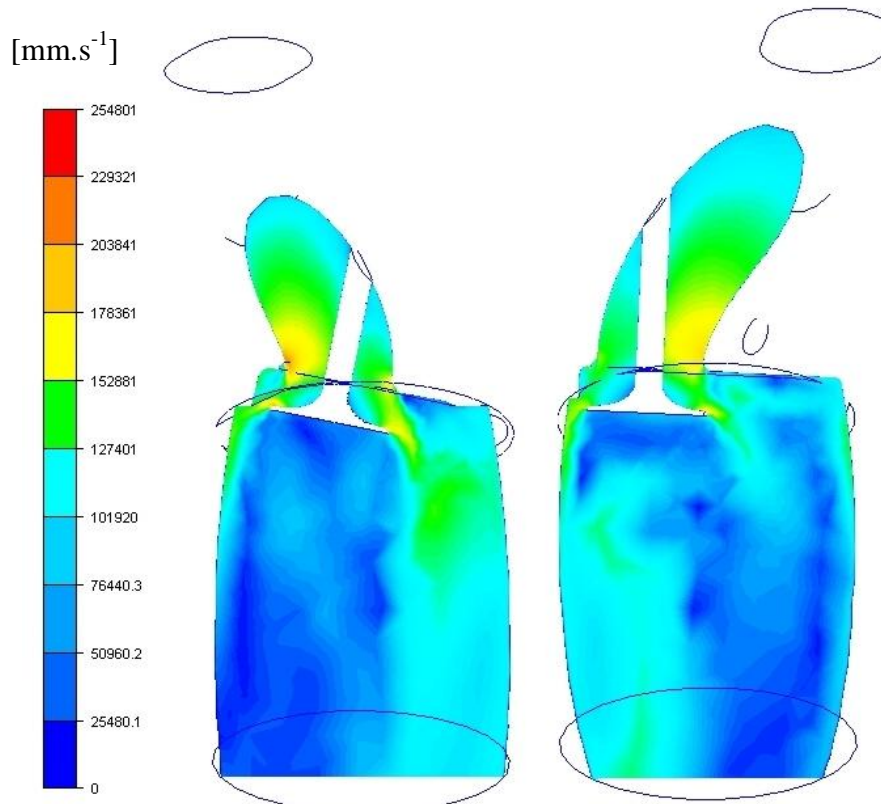


Obr. 85 Řezy osami ventilů u modelu s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 9 mm





Obr. 86 Řezy osami ventilů u modelu s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 10 mm

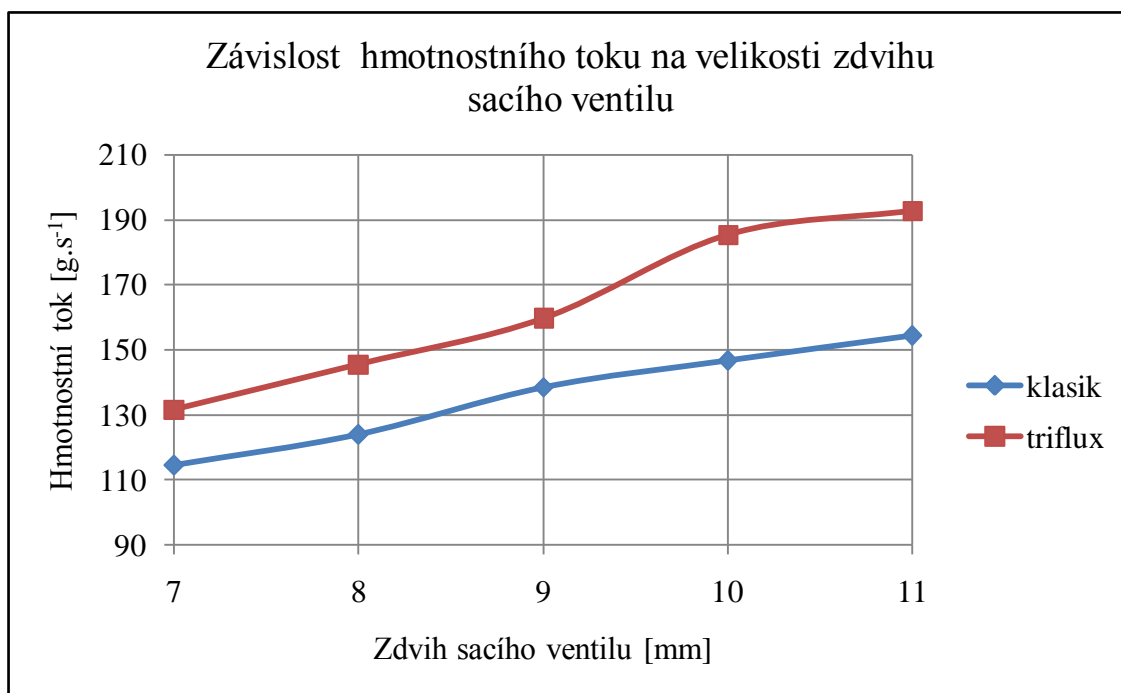


Obr. 87 Řezy osami ventilů u modelu s uspořádáním typu triflux - zdvih sacích ventilů 11 mm

V průběhu analýzy a samozřejmě i po ní bylo možné sledovat hodnoty hmotnostního toku, teploty, tlaků, rychlosti, viskozity či hustoty, a to v jakémkoli místě modelu. Já jsem sledovala zejména hodnoty hmotnostního toku, který musí mít podle rovnice kontinuity v jakémkoli průřezu stejnou hodnotu. Hmotnostní toky jsem dále porovnávala mezi modely s klasickým uspořádáním sacích kanálů a uspořádáním triflux. Výsledné hodnoty hmotnostního toku jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1) a dále zpracovány v grafu závislosti hmotnostního toku na zdvihu sacího ventilu (Graf 1).

Zdvih [mm]	Hmotnostní tok [g.s <sup>-1</sup> ]		Nárůst hmotnostního toku	Rychlost na vstupu [m.s <sup>-1</sup> ]		Počet iterací	
	klasik	triflux		klasik	triflux	klasik	triflux
7	114,478	131,718	15 %	73,6	93,66	395	571
8	123,872	145,563	17,5 %	79,5	102,65	745	676
9	138,453	159,567	15,3 %	88,6	112,6	1134	678
10	146,620	185,354	26,4 %	93,7	128,9	635	429
11	154,262	192,821	25 %	98,4	134,5	807	874

Tab. 1 Hodnoty hmotnostního toku a počtu iterací



Graf 1 Závislost hmotnostního toku na zdvihu sacího ventilu

## 12. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo proniknout do problematiky počítačové dynamiky tekutin a problematiky proudění obecně a následně tyto znalosti využít pro návrh modelu hlavy válce typu triflux zážehového motoru, který je v závěru podroben analýze ustáleného proudění v CFD prostředí.

Za základ pro vytvoření modelu hlavy válce typu triflux, resp. modelu sacích kanálů a spalovacího prostoru, jsem si zvolila hlavu válce motoru Škoda 1,2 HTP. Hlavním důvodem pro moji volbu bylo to, že jsem chtěla vytvořit nejen model hlavy válce typu triflux, ale i model hlavy válce současného reálného motoru a obě varianty nakonec porovnat. Rozměry jsem chtěla získat z reálného modelu, což byl další důvod pro hlavu válce motoru Škoda, jelikož je k dispozici na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. K získání 3D digitální podoby hlavy válce motoru jsem využila 3D skener ATOS nacházející se opět na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Hlava válce se musela před skenováním očistit, na povrch byla sprejem nanесena vrstva křídý a umístěny kontrolní body (terčíky).

Po nastavení a kalibraci skeneru proběhlo samotné skenování hlavy válce. Naskenovaný model bylo nutno dále upravit, jelikož výstupem digitalizace je pouze mračno bodů. Dalším krokem tedy bylo vytvoření 3D modelu pomocí programu Pro/ENGINEER.

Nejdříve jsem dle naskenovaných dat vytvořila model střechovitého spalovacího prostoru a doplnila jej válcem motoru. Tento získaný model je společným základem pro obě verze (klasickou a triflux) umístění sacích kanálů. Jako první byl vytvořen model s klasickým uspořádáním sacích kanálů, přičemž byl zachován profil vstupu sacích kanálů do hlavy válce získaný 3D skenerem. Po vymodelování sacích kanálů byly vytvořeny sací ventily a přidána zapalovací svíčka. U modelu s rozmístěním sacích kanálů triflux vstupují sací kanály shora, proto jsem při návrhu musela počítat s dostatečným prostorem zbylým na výfukové kanály a s možností demontáže zapalovací svíčky. V případě tvarování sacích kanálů systému triflux nebyly moc velké možnosti, a to vzhledem k velikosti válce a spalovacího prostoru zvoleného motoru.

Poslední fází byla CFD analýza. Oba vytvořené CAD modely nejdříve prošly diskretizací neboli vygenerováním nestrukturované sítě tvořené čtyřstěnnými elementy, načež byla provedena simulace stacionárního proudění nasávaného vzduchu těmito modely. Stacionární proudění vzduchu bylo dále zvoleno jako stlačitelné a turbulentní, aby co nejvíce napodobovalo reálné proudění. Jako okrajové podmínky jsem zvolila hodnoty odpovídající proudícímu vzduchu. Na vstupu a na výstupu modelu byly zvoleny hodnoty tlaku tak, aby vznikl tlakový spád. Samotná simulace proudění vzduchu sacím kanálem byla velice náročná, a to hlavně co se týče hardwarových a s tím spojených časových nároků. Při vytváření výpočtové studie bylo totiž primárním kritériem určující konvergence co nejmenší změna každého stupně volnosti, což vyžadovalo velké množství iterací (viz Tab. 1).

Simulace proudění vzduchu modelem se sacími kanály klasického uspořádání, byla stejně jako u modelu se sacími kanály uspořádanými dle systému triflux prováděna pro různé zdvihy sacích ventilů. Výsledky jsou prezentovány jako modely s proudnicemi rychlosti a modely v řezech vedených osou sacího ventilu, přičemž obě tyto varianty by měly sloužit k porovnání rozdílů, poukázat na plnění válce a s tím spojené nedostatky, případně odhalit vznikající víření ve válci motoru.

Oba modely s pěti variantami zdvihu sacích ventilů byly porovnány obzvláště z hlediska hmotnostního toku, který dle předpokladů se zvyšujícím zdvihem sacích ventilů narůstal (viz Tab. 1). Zajímavé pak bylo samotné srovnání modelu s klasickým uspořádáním sacích kanálů a modelu s uspořádáním typu triflux. Ukázalo se, že konstrukce typu triflux navyšuje hodnotu hmotnostního toku, přičemž maximální nárůst byl zaznamenán při zdvihu sacích ventilů na 10 mm a to o 26,4 %. Je ovšem otázkou, zda spolu s ostatními výhodami systému triflux (výfukové potrubí po obou stranách motoru, umístění dvou turbodmychadel, lepší distribuce tepla) může tato skutečnost vyvážit složitou konstrukci hlavy válce typu triflux.

Nutno ještě podotknout, že na plnění válce motoru má nezanedbatelný vliv také geometrie sacího ventilu. Naplnění válce ovlivňuje zejména rádius přechodové hrany z dříku na talířek ventilu. Platí zde, že čím větší je rádius hrany ventilu, tím větší je hmotnostní naplnění válce.

Na závěr bych chtěla uvést, že takto provedená analýza simulace proudění je pouze informativní, je zde totiž uvažováno pouze proudění vzduchu a ne směsi, a také není zohledněn celý sací systém motoru. Nicméně všechny body zadání diplomové práce byly splněny.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Ferziger, J. H., Perić, M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3. vyd. 2002. ISBN 3-540-42074-6.
- [2] Katz, J. Race Car Aerodynamics. 3. vyd. 2004. ISBN 0-8376-0142-8.
- [3] Molnár, V. Počítačová dynamika tekutin [online]. 2006, poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.cfd.sk/cfd-book>>
- [4] Pro/ENGINEER Resource Center [online]. 2006, poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <[http://www.ptc.com/community/resource\\_center/proengineer/index.htm](http://www.ptc.com/community/resource_center/proengineer/index.htm)>
- [5] Release 10.0 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc. 2005.
- [6] Syed, R. A. Aerodynamics of Road Vehicle - Computational Fluid Dynamics. 4. vyd. 1998. ISBN 0-7680-0029-7.
- [7] Hofmann, K. Proudění ve spalovacích motorech. 1. vyd. 1987.
- [8] Šob, F. Hydromechanika. 2002. ISBN 80-214-2037-5
- [9] Hofmann, K. Turbodmychadla a vozidlové turbíny - Přepřínování spalovacích motorů. 1. vyd. 1981.
- [10] Vlk, F. Vozidlové spalovací motory. 1. vyd. 2003. ISBN 80-238-8756-4
- [11] Rauscher, J. Spalovací motory. Studijní opory Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT BRNO.
- [12] Wikipedie - Otevřená encyklopedie [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD\\_strana](http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD_strana)>
- [13] Aerodynamika [online]. Studijní opory Leteckého ústavu FSI VUT BRNO.  
Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php#1.2>>
- [14] Výzkumné centrum spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka [online].  
Poslední revize 7.5.2008. Dostupné z: <<http://www3.fs.cvut.cz/web/index.php?id=934>>
- [15] Západočeská univerzita v Plzni, Katedra konstruování strojů [online].  
Poslední revize 7.5.2008. Dostupné z: <<http://www.kks.zcu.cz>>
- [16] Computational Engineering International (CEI) [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.ensight.com>>
- [17] TechSoft Engineering [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <[http://www.techsoft-eng.cz/cfd\\_analyzy](http://www.techsoft-eng.cz/cfd_analyzy)>
- [18] CFD Online [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.cfd-online.com>>
- [19] ANSYS [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.ansys.com/products/default.asp>>
- [20] SVS FEM [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.svsfem.cz/index.php/public/page.php?pgid=1>>
- [21] Západočeské superpočítačové centrum [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://zsc.zcu.cz>>
- [22] Flownex [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.flownex.com/?page=home>>
- [23] Flowmaster [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.flowmaster.com/index.html>>
- [24] Visenso [online]. Poslední revize 7.5.2008. Dostupné z: <<http://www.visenso.de>>
- [25] Tecplot [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.tecplot.com/products/360/index.aspx>>
- [26] GridPro [online]. Poslední revize 7.5.2008. Dostupné z: <<http://www.gridpro.com>>

- [27] CentaurSoft [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.centaursoft.com>>
- [28] ESI Group [online]. Poslední revize 7.5.2008. Dostupné z: <<http://www.esi-group.com>>
- [29] ZeusNumerix [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.zeusnumerix.com>>
- [30] CD-adapco [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.cd-adapco.com>>
- [31] TZB-info. CFD na ústavu techniky prostředí [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2975>>
- [32] Group B Rally [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://groupbrally.com/lancia.shtml>>
- [33] Bella Machina [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://www.bellamacchina.net/forum/viewtopic.php?t=150>>
- [34] MCAE SYSTEMS - digitizing ATOS [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <[http://www.mcae.cz/3d\\_digitalizace\\_a\\_mereni\\_CS.html](http://www.mcae.cz/3d_digitalizace_a_mereni_CS.html)>
- [35] Kolavík, J. 3D Digitalizace prostorových objektů v soudně inženýrské praxi [online].  
2008, poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <[www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/7/Kolavik\\_Jiri\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/7/Kolavik_Jiri_CL.pdf)>
- [36] Skoupý, P. 3D optické měřicí a skenovací systémy pro strojírenství. Brno: FSI VUT,  
2007
- [37] conVERTER [online]. Poslední revize 7.5.2008. Dostupné z: <<http://www.converter.cz>>
- [38] 3D digitalizace [online]. Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/main04.html>>
- [39] Vozidlové motory [online]. Katedra vozidel a motorů, Technická univerzita v Liberci.  
Poslední revize 7.5.2008.  
Dostupné z: <[www.ksd.vslib.cz/studenti/texty/VOZMOT.pdf](http://www.ksd.vslib.cz/studenti/texty/VOZMOT.pdf)>
- [40] Jedelský, J. Kaplan, Z. Motory a pohony. Studijní opory Ústavu automobilního  
a dopravního inženýrství FSI VUT BRNO.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

a	Zrychlení do směru potrubí	$[\text{m.s}^{-2}]$
c	Rychlost zvuku	$[\text{m.s}^{-1}]$
$c_p$	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
$c_v$	Měrná tepelná kapacita při stálém objemu	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
d	Průměr trubice	$[\text{mm}]$
$d_v$	Průměr ventilu	$[\text{mm}]$
$dv/dy$	Gradient rychlosti	$[-]$
e	Celková specifická energie ideálního plynu	$[\text{J}]$
E	Energie tekutiny	$[\text{J}]$
$E_i$	Vnitřní energie	$[\text{J}]$
$E_k$	Kinetická energie	$[\text{J}]$
$E_p$	Geopotenciální energie	$[\text{J}]$
F	Celková síla	$[\text{N}]$
$F_i$	Specifické síly působící na kontrolní objem	$[\text{N}]$
$F_m$	Hmotnostní síla na jednotku hmotnosti	$[\text{N}]$
$F_p$	Tlaková síla na jednotku hmotnosti	$[\text{N}]$
$F_s$	Setrvačná síla na jednotku hmotnosti	$[\text{N}]$
$F_x$	Oporová síla	$[\text{N}]$
$F_z$	Vztlaková síla	$[\text{N}]$
g	Tíhové zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
h	Výška zdvihu ventilu	$[\text{mm}]$
$i_v$	Počet válců motoru	$[-]$
k	Otáčkový součinitel	$[-]$
l	Délka	$[\text{m}]$
m	Hmotnost	$[\text{kg}]$
M	Machovo číslo	$[-]$
$M_c$	Hmotnost celkové čerstvé náplně motoru	$[\text{kg}]$
$M_t$	Hmotnost teoreticky dopravitelné náplně motoru	$[\text{kg}]$
$M_v$	Hmotnost čerstvé náplně jednoho válce	$[\text{kg}]$
$\dot{m}$	Hmotnostní tok	$[\text{kg.s}^{-1}]$
$\dot{m}_c$	Hmotnostní tok čerstvé náplně motoru	$[\text{kg.s}^{-1}]$
$\dot{m}_t$	Teoretický hmotnostní tok	$[\text{kg.s}^{-1}]$
n	Otáčky motoru	$[\text{min}^{-1}]$
p	Tlak	$[\text{Pa}]$
P	Tlaková funkce	$[\text{J.kg}^{-1}]$
$p_c$	Celkový tlak	$[\text{Pa}]$
$p_d$	Dynamický tlak	$[\text{Pa}]$
$p_e$	Střední efektivní tlak na píst	$[\text{Pa}]$
$P_e$	Efektivní výkon pístového spalovacího motoru	$[\text{W}]$
$p_k$	Kinetický tlak	$[\text{Pa}]$
$p_n$	Normální atmosférický tlak	$[\text{Pa}]$
$p_s$	Statický tlak	$[\text{Pa}]$
$\dot{q}$	Vedení tepla v tekutině	$[\text{J}]$
$\dot{Q}$	Přivedené teplo z kontrolního objemu	$[\text{J}]$
$\dot{Q}_i$	Teplo vytvořené objemovým ohřevem	$[\text{J}]$
r	Měrná plynová konstanta	$[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	Průřez kanálu	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>K</sub>	Plocha kanálu v místě vnitřního průměru sedla	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>V</sub>	Válcová plocha mezi ventilem a sedlem ventilu	[mm <sup>2</sup> ]
t	Čas	[s]
T	Termodynamická teplota	[K]
u	Unášivá rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
U	Potenciál	[J.kg <sup>-1</sup> ]
v	Rychlost proudění	[m.s <sup>-1</sup> ]
V	Objem	[m <sup>3</sup> ]
v <sub>s</sub>	Střední hodnota proudění tekutiny v daném průřezu	[m.s <sup>-1</sup> ]
V <sub>S</sub>	Skutečný spotřebovaný objem vzduchu na válec	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>Z</sub>	Zdvihový objem válce	[m <sup>3</sup> ]
w	Relativní rychlost pohybu tekutiny	[m.s <sup>-1</sup> ]
w <sub>∞</sub>	Rychlost nenarušeného proudu	[m.s <sup>-1</sup> ]
Ŵ	Práce vnějších sil působících na kontrolní objem	[J]
z	Svislá výška	[m]
β	Úhel sedla ventilu	[°]
η	Dynamická viskozita	[N.s.m <sup>-2</sup> ]
η <sub>P</sub>	Plnicí účinnost	[-]
η <sub>V</sub>	Objemová účinnost	[-]
κ	Poissonova konstanta	[-]
λ	Tepelná vodivost	[-]
μ	Průtokový součinitel	[-]
μ <sub>1</sub>	Úhel odklonění Machovy čáry od směru proudu	[°]
ν	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
ρ	Hustota média	[kg.m <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>1</sub>	Hustota vzduchu před sacím kanálem	[kg.m <sup>-3</sup> ]
σ	Uzavírací číslo	[-]
τ	Tečné napětí	[MPa]
φ	Úhel sklonu potrubí	[°]
ω	Úhlová rychlost	[s <sup>-1</sup> ]